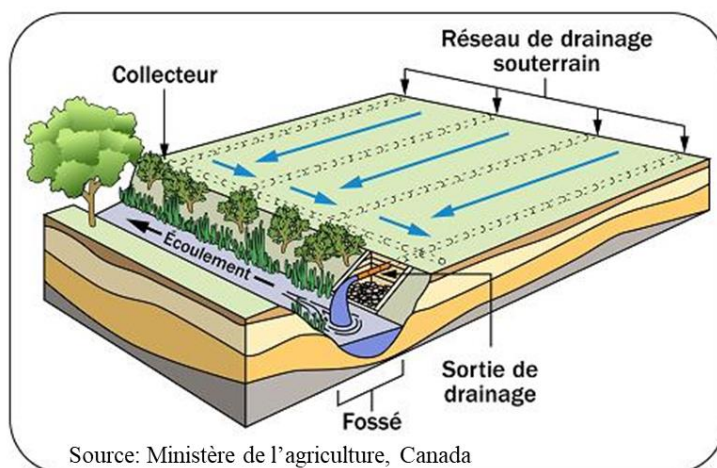


Mémoire
présenté pour l'obtention du Master 1
Mention : Eau
Parcours : Eau et Agriculture

Développement d'un outil d'évaluation de la surface impactée par le drainage agricole pour la protection des zones humides



Par Anas HADRI

Mémoire présenté le : 19/06/2023

Membres du jury :

Organisme d'accueil : INRAE-Antony
Enseignant tuteur : Flavie Cernesson
Maîtres de stage : Hocine Henine

Résumé

En France, tout aménagement dont la surface d'impact sur une zone humide dépasse le seuil autorisé par la loi donne lieu à une déclaration ou à une autorisation. Cette dernière doit être faite par l'aménageur. Cette étude vise à déterminer la surface de la zone humide impactée par l'aménagement en utilisant une approche numérique. On a utilisé le logiciel HYDRUS 2D pour modéliser les écoulements saturés/non saturés 2D basée sur l'équation de Richards. L'objectif de ce stage consiste, dans un premier temps, à calculer la distance latérale d'impact pour différentes typologies de zones humides et d'aménagements (drain enterré ou fossé). Dans un deuxième temps, l'objectif est de réaliser une analyse de sensibilité pour identifier les paramètres les plus influents dans le calcul de la surface impactée par un ouvrage de drainage, cela permettra de définir le niveau de précision requis pour chaque paramètre afin d'obtenir une incertitude acceptable sur la surface impactée, rendant ainsi l'outil opérationnel. Ceci permettra à la fin de décider si l'aménageur est dans une situation régulière ou s'il doit procéder à une déclaration ou à une autorisation avant tout aménagement effectué dans une zone humide.

Mots clés : Drainage agricole , Zone humide, modélisation hydrodynamique, impact, drain, fossé , analyse de sensibilité.

Abstract

In France, any development that exceeds the threshold allowed by law and impacts a wetland requires a declaration or authorization. The farmer must respect and do the administrative procedure. This study aims to determine the area of the wetland impacted by the drainage management using a numerical approach. We used the HYDRUS 2D software, which models 2D saturated/unsaturated flow based on the Richards equation. The main objective is to calculate the lateral distance of impact for different types of wetlands and management scenarios (buried drain or ditch). Subsequently, a sensitivity analysis is conducted to identify the most influential parameters in calculating the surface impacted by a drainage structure. This will help define the required level of precision for each parameter to achieve an acceptable uncertainty on the impacted area, making the tool operational. Ultimately, this will enable the evaluation of the impact surface on the wetland and determine whether the developer is in compliance or needs to submit a declaration or obtain authorization prior to any development carried out on the wetland.

Key words : Drainage , Wetland, hydrodynamic modeling, drainage impact, drain, ditch, sensitivity analysis.

Sommaire

RESUME.....	3
ABSTRACT.....	3
SOMMAIRE.....	4
GLOSSAIRE.....	5
SIGLES ET ACRONYMES.....	5
DESCRIPTION D'ORGANISME D'ACCUEIL	6
INTRODUCTION	7
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	8
OUTILS ET METHODE	14
RESULTATS ET DISCUSSION.....	20
CONCLUSION	27
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	28
ANNEXES	30
LISTE DES FIGURES	36
LISTE DES TABLEAUX.....	36
TABLE DES MATIERES	37

Glossaire

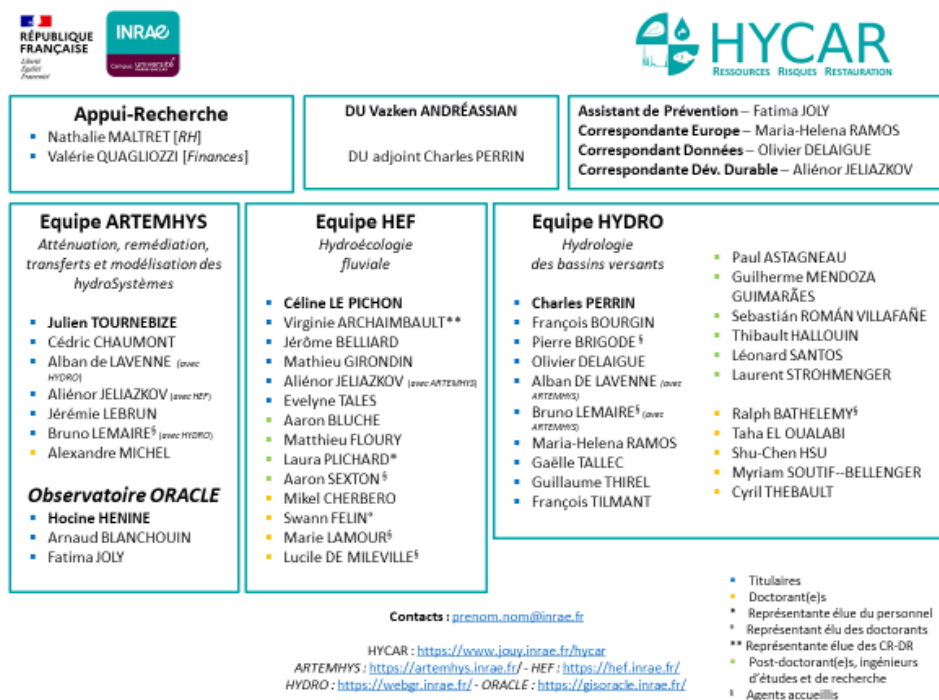
Indices	Définitions
α	Paramètre alpha dans les équations de Van Genuchten
n	Paramètres n dans les équations de Van Genuchten
θ	Teneur en eau
θ_s	Teneur en eau à saturation
θ_r	Teneur en eau résiduelle
K_s	Conductivité hydraulique saturée
K	Conductivité hydraulique
h	Niveau de la nappe phréatique
R	Recharge
ETP	Évapotranspiration potentielle
Se	Saturation effective
l	Coefficient de connexion des pores

Sigles et acronymes

Sigles et acronymes	Définitions
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
OFB	Office français de la biodiversité
HYCAR	Hydrosystèmes Continentaux Anthropisés–Ressources, Risques, Restauration
ARTEMHYS	Atténuation, Remédiation, Transferts et Modélisation dans les Hydrosystèmes
IOTA	Installations, Ouvrages, Travaux ou Activités
SDAGE	Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
OAT	analyses locales One-at-a-time
GSA	Global systems analysis “analyses globales”
MO	matière organique

Description d'organisme d'accueil

INRAE, l'institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, est le résultat de la fusion de l'Inra et d'Irstea. Il se consacre à la recherche, à l'innovation et à l'appui aux politiques publiques dans ces trois domaines. Le centre de recherche INRAE Île-de-France - Jouy-en-Josas - Antony est l'un des 18 centres de recherche d'INRAE. Il est reconnu mondialement pour ses travaux en biologie et biotechnologie, mobilisant des chercheurs de différentes disciplines ainsi que des ressources en mathématiques et informatique. (INRAE, 2021). Le stage se déroule dans le centre de recherche INRAE – Antony, dans l'unité HYCAR (Hydrosystèmes Continentaux Anthropisés–Ressources, Risques, Restauration), l'équipe ARTEMHYS (Atténuation, Remédiation, Transferts et Modélisation dans les Hydrosystèmes). Sous la tutelle de H. HENINE, B. LEMAIRE, A. DELAVENNE, et J. TOURNEBIZE.



20/03/2023

Figure 1: Organigramme du centre Ile-de-France - Jouy-en-Josas - Antony (INRAE)

Dans le cadre d'un partenariat INRAE-OFB (Office français de la biodiversité), mon stage consiste à réaliser une analyse de sensibilité pour identifier les paramètres les plus influents dans le calcul de la surface impactée par un ouvrage de drainage agricole. Je produis des scripts R pour simuler différentes configurations (type de sol, pente, aménagement, profondeur du drainage) avec Hydrus-2D. Mon objectif est d'évaluer l'effet de ces paramètres hydrodynamiques sur le rabattement de la nappe souterraine et, par conséquent, l'impact direct sur la zone humide (mesure de la surface impactée par le drainage).

Introduction

Les zones humides sont des écosystèmes naturels qui se caractérisent par leur diversité et leurs particularités. Selon la loi française, définie dans l'article L.211-1 du code de l'environnement, les zones humides sont des terrains qui sont régulièrement ou temporairement inondés ou saturés d'eau douce, salée ou saumâtre. Ces terrains peuvent être exploités ou non, et leur végétation est principalement composée de plantes hygrophiles, dominantes une partie de l'année. (*Article L211-1- Légifrance*, 2016)

Les zones humides jouent un rôle crucial dans les aspects hydrologiques, biogéochimiques et écologiques (Rapinel et al., 2019). Elles offrent une biodiversité unique et des services écosystémiques importants, tels que la régulation des inondations, la recharge des nappes phréatiques et le traitement de la pollution. Malheureusement, ces écosystèmes sont menacés et se dégradent chaque année, notamment en raison du drainage intensif pour l'agriculture (Brinson & Malvárez, 2002).

En France, au début du XVI^e siècle jusqu'au milieu du XX^e siècle, l'assèchement et la mise en valeur des terres humides sont pratiqués et même encouragés (Cizel, 2017). Cette pratique est encouragée à des fins d'hygiène (les marais insalubres sont considérés comme vecteurs de plusieurs épidémies) ou agricoles (augmentation de la SAU). Ce n'est qu'au début des années 2000 que ces milieux sont reconnus comme étant des espaces d'intérêt général. Le droit à la protection de ces milieux a largement évolué au cours des dernières décennies (Cizel, 2017). La loi sur l'eau, par l'article 211.1 du code de l'environnement, dans sa rubrique 3.3.2.0, a encadré les Installations, Ouvrages, Travaux ou Activités (IOTA), comme le drainage agricole ou le retournement des prairies, mis en œuvre notamment en zones humides et qui y modifient le niveau et le mode d'écoulement de l'eau. La réglementation s'appuie sur le principe de surfaces minimales à partir desquelles les IOTA sont soumis à autorisation (100ha) ou à déclaration administrative (1 à 20) ha (*Article L211-1- Légifrance*, 2016).

Cette étude vise à calculer la distance d'influence latérale d'un système de drainage sur une zone humide, puis à tester la sensibilité des paramètres d'entrée les plus influents sur cette distance. La méthode doit être simple, robuste et applicable à toutes les typologies de zones humides en France. Une revue bibliographique présentera les travaux récents sur les zones humides, leurs dégradations et les mesures de protection mises en place. La méthodologie et les étapes à suivre seront détaillées, ainsi que l'utilisation d'un logiciel de modélisation. Les résultats obtenus à partir de données existantes seront exposés et discutés. La conclusion résumera le travail accompli, mettant en avant les principaux résultats et suggérant des améliorations possibles pour la méthode développée.

Étude bibliographique

Dans la littérature, le terme zone humide a plusieurs définitions (Tiner, 2016). En France, on retient la disposition citée dans le Code de l'environnement (*Article L211-1- Légifrance*, 2016) selon laquelle les zones humides sont des terrains, aménagés ou non, normalement inondés ou saturés d'eau douce, saumâtre ou saumâtre de façon permanente ou temporaire, végétation si présente, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année (**Figure 2**).

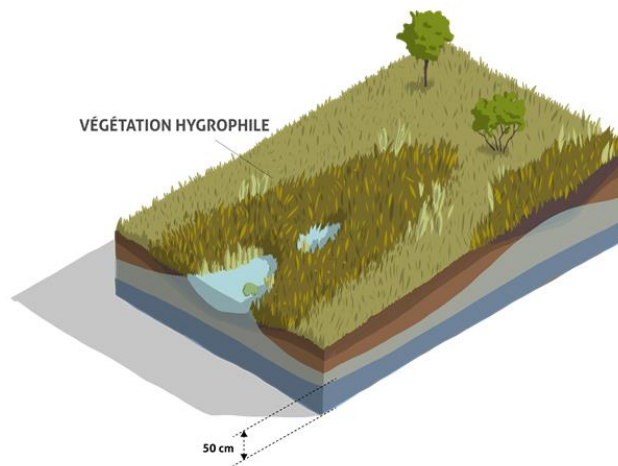


Figure 2: schéma d'une zone humide (zones-humides.org)

Pour la France métropolitaine & la Corse, les critères de délimitation et de définition d'une zone humide ont été explicités afin de faciliter une appréciation partagée de ce qu'est une zone humide en vue de leur préservation par la réglementation. (*Article L214-7 - Légifrance*, 2016) et (*Article R211-108 - Légifrance*, 2016).

Au niveau international, la « Convention de Ramsar » (1971) a créé la « Convention sur la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources » (Convention Ramsar, 1971). Cette définition comprenait un certain nombre d'environnements marins, y compris les récifs coralliens et les herbiers marins, ainsi que les cours d'eau et les habitats souterrains.

En France, la délimitation des zones humides dépend de deux principaux critères : l'hydromorphologie du sol et le type de végétation. De même, la classification des zones humides change d'un pays à un autre. Celle établie par Brinson (1933) sert comme référence. Il propose une classification abiotique des fonctions des zones humides. Trois composantes ont été retenues : la configuration géomorphologique de la zone humide (topographie, pédologie...), la source principale de l'eau (précipitation, eau de surface, subsurface ou eau d'origine souterraine) et l'hydrodynamique (direction principale du flux qui alimente la nappe). Gayet et al. (2016) ont adapté une classification pour qu'elle soit applicable en France. Cinq systèmes hydrogéomorphologiques d'un total de sept ont été retenus (**Tableau 1**).

Tableau 1: Apports majeurs d'eau et caractéristiques hydrodynamiques dominantes des classes hydrogéomorphologiques modifié d'après (Ammann, Smith, 1995)

Système hydrogéomorphologiques	Source d'eau dominante	Hydrodynamique dominante
Alluvial	Débordement de cours d'eau	Unidirectionnelle, horizontale.
Riverain des étendues d'eau	Débordement des étendues d'eau	Bidirectionnelle, horizontale
Dépression	Décharge de nappe et apports de subsurface	Verticale
Versant et bas versant	Décharge de nappe	Unidirectionnelle, horizontale
Plateau	Précipitation	Verticale

Les chercheurs Brinson & Malvárez (2002) ont évalué les menaces pesant sur les zones humides à travers le monde et ont constaté une perte significative de biodiversité due à la réduction des surfaces et à la détérioration de ces milieux. Ward et al. (1999) ont souligné l'importance de préserver les habitats des espèces menacées qui dépendent des zones humides. Blann et al. (2009) ainsi que Lemly et al. (2000) ont confirmé la disparition croissante des zones humides en raison de l'exploitation agricole intensive et du drainage. Ils ont tous insisté sur la nécessité de mettre en place des stratégies de protection, de restauration et de renforcement des lois régissant l'exploitation des zones humides. Les autorités publiques doivent s'impliquer à différentes échelles pour assurer le succès de ces stratégies et mettre à jour les lois réglementant l'exploitation et la conversion des zones humides à des fins agricoles.

Sheler (2013) a étudié l'impact du drainage agricole sur la réponse hydrologique des zones humides. Il a conclu que la réponse hydrologique d'un bassin versant drainer est influencée par le type de sol, ses propriétés hydrauliques et hydrodynamique et le régime pluviométrique, en lien avec cette étude, Amatya et al. (1995) ont montré que l'emplacement et la superficie des zones humides influencent également la réponse hydrologique d'un bassin versant.

Dans leurs études respectives, Winter & LaBaugh (2003) ont remis en question la définition des zones humides de dépression en soulignant l'importance de l'hydrologie pour les distinguer. D'autre part, Holden et al. (2003) se sont penchés sur l'impact du drainage artificiel des tourbières sur les propriétés hydrologiques et chimiques de ces écosystèmes. Leurs conclusions ont mis en évidence la nécessité de protéger les tourbières en bon état et de restaurer les zones qui ont été dégradées. Ainsi, il est crucial de prendre en compte l'hydrologie dans la définition des zones humides de dépression et de mettre en œuvre des mesures de conservation pour préserver ces écosystèmes fragiles.

La protection des milieux humides est cruciale. Les États-Unis et le Canada interdisent les aménagements néfastes et exigent la restauration, considérant les zones humides comme des systèmes complexes avec leurs caractéristiques spécifiques, et ne doit pas se limiter à la simple reproduction d'une nouvelle, car Chaque zone humide a ses propres caractéristiques hydrologiques, chimiques et biologiques qui doivent être prises en considération lors du processus de restauration (Bedford, 1999).

En France, le concept de fonctionnalités équivalentes a été introduit par le SDAGE (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) pour minimiser l'impact sur les zones humides. En cas de dégradation, des mesures compensatoires sont préconisées pour restaurer la superficie et les fonctionnalités sur un site équivalent. Le processus de la directive-cadre sur l'eau comprend quatre étapes : état des lieux, SDAGE, programmes de mesures et mise en œuvre (Ecologie.gouv.fr, 2023).

La recherche sur l'évaluation de l'impact des aménagements en zone humide a principalement porté sur la démonstration de cet impact et l'étude de la dégradation du milieu humide associé. Cependant, peu de chercheurs se sont intéressés à la prédiction et à la quantification de l'impact du drainage sur les zones humides par le biais de la modélisation. Skaggs et al. (2002) ont développé une méthode basée sur le manuel de délimitation des zones humides (Army, 1987) et le logiciel DRAINMOD pour déterminer la distance latérale d'impact d'un système de drainage. Cette distance d'impact du fossé ou du drain est calculée en résolvant l'équation adimensionnelle de Boussinesq transformée sous forme d'abaque par Skaggs (1976). Cette méthode présente des limites, notamment son influence climatique et son applicabilité limitée aux zones humides alimentées principalement par les précipitations. De plus, elle ne peut être généralisée à toutes les zones humides en France, car elle a été développée en se basant sur des conditions spécifiques de nappe proche de la surface.

La modélisation numérique a été largement utilisée dans l'agriculture pour dimensionner et optimiser les réseaux de drainage. Les logiciels SIDRA (Lesaffre, 1989), DRAINMOD (Skaggs et al., 2012), MODFLOW (Hill et al., 2000) et HYDRUS-2D (J. Å imunek et al., 2012) sont réputés pour leur précision et leur simplicité. Cependant, chaque logiciel présente des limites (Crossley & Reynolds, 2005). Des études ont démontré l'efficacité de DRAINMOD dans le dimensionnement des réseaux de drainage et la précision de HYDRUS-2D dans la simulation des teneurs en eau. Il est recommandé de développer des méthodes simplifiées basées sur HYDRUS-2D pour étudier l'impact du drainage sur l'environnement, car ce logiciel offre une plus grande flexibilité que DRAINMOD.

Généralités sur les zones humides et leur fonctionnement

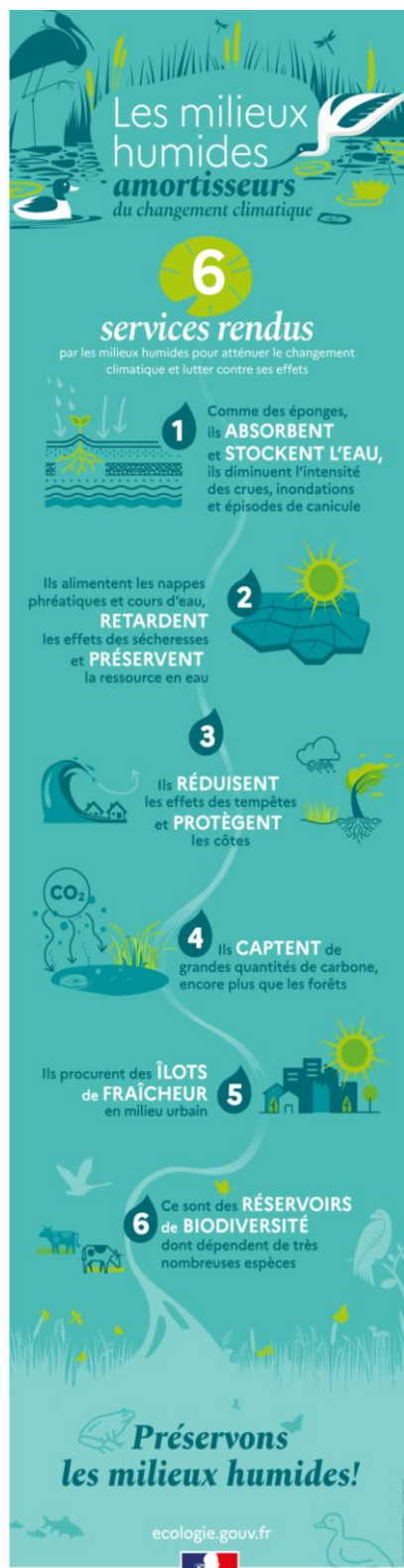


Figure 3 : services rendus par les ZH (ecologie.gouv.fr)

Les zones humides, délimitées selon l'hydromorphologie du sol, le fonctionnement hydrologique et le type de végétation (**Figure 4**), sont des écosystèmes d'une grande importance. Elles sont reconnues d'intérêt général pour leur préservation et leur gestion durable, conformément à l'article L.211-1-1 du code de l'environnement. Ces zones remplissent des fonctions essentielles, telles que les fonctions hydrologiques, biogéochimiques et écologiques, offrant ainsi des avantages tels que l'écroulement des crues, l'épuration des eaux et l'habitat pour la biodiversité (**Figure 3**). De nombreuses espèces de plantes et d'animaux dépendent des zones humides pour leur survie, ce qui justifie leur protection en vertu de l'article L.411-1 du code de l'environnement. (Article L211-1- LégiFrance, 2016 ; Article L214-7 - LégiFrance, 2016).



Figure 4 : critères de définition et de délimitation d'une zone humide (ecologie.gouv.fr)

Typologie du sol en zone humide (Zanella et al., 2011)

Les différents types de sols jouent un rôle crucial dans la compréhension du fonctionnement hydrogéologique des zones humides. On distingue deux grandes catégories de sols : les sols minéraux et les sols organiques (histosols), dont la différence repose sur la teneur en matière organique (dépassant ou non 30%) (Barnaud & Fustec, 2007). La matière organique, représentée par la présence d'humus, qui est définie comme étant la partie supérieure du sol, principalement composée de débris végétaux plus ou moins transformés (Zanella et al., 2011), et dont l'oxygénation du milieu conditionne son évolution. Selon des critères morpho-chimiques établis

par Delecour (1978), on peut distinguer quatre types d'humus en fonction de l'intensité et de la durée de l'engorgement, du pH et du couvert végétal : Hydromull, Hydromoder, Hydromor et Anmoor.

Sols minéraux

Les sols minéraux, avec une teneur en matière organique inférieure à 30% et un engorgement quasi-permanent, permettent la formation de divers types de sols. Parmi eux, on trouve les fluvisols près des cours d'eau, les reductisols saturés en eau, les redoxisols influencés par la fluctuation de la nappe, les planosols à faible relief, les luvisols hydromorphes et les thalassosols côtiers. Plus de détail dans **Annexes A**.

Les sols organique des milieux humides (histosols)

Les histosols, riches en matière organique (MO) et saturés en eau, se caractérisent par un engorgement permanent et une faible teneur en oxygène, ce qui ralentit la décomposition de la MO. Ces sols sont généralement présents dans les régions montagneuses à climat froid et pluvieux. Leur présence dans les plaines indique souvent une nappe souterraine peu profonde.

Fonctionnement hydrologique des zones humides

Il est essentiel de comprendre le fonctionnement hydrologique d'une zone humide avant de modéliser les écoulements souterrains. Un bilan hydrologique permet d'identifier l'excès d'eau et de le quantifier. Les origines de cet excès peuvent être météorologiques (précipitations), souterraines (eaux circulant dans le sol) ou de surface (interaction nappe-rivière). Le drainage artificiel peut contrôler les pertes d'eau, mais s'il n'est pas maîtrisé, il peut déséquilibrer le bilan hydrologique et perturber l'écosystème.

Méthode d'estimation de la hauteur de nappe en zone humides

La hauteur de la nappe est cruciale pour comprendre la dynamique hydrologique des zones humides. Son suivi périodique permet de classer les zones humides en fonction de l'hydropériode de la nappe. Deux méthodes sont couramment utilisées pour acquérir ces données : la méthode manuelle par sondage à la tarière, qui est simple et peu coûteuse, et la méthode automatique piézométrique, plus coûteuse mais offrant des relevés précis et fréquents. Ces données sont essentielles pour valider les modèles numériques et prévoir les fluctuations de la nappe souterraine (Gayet et al., 2016).

Drainage

Définition en rapport avec le drainage

D'après le glossaire des termes officiels de l'hydraulique du drainage agricole (CEMAGREF, 1990) :

Le **drainage** est une technique visant à éliminer l'excès d'eau ou de sels dans les terrains, qu'ils soient agricoles ou non. Le drainage agricole, quant à lui, est spécifiquement appliqué aux parcelles agricoles. Il

existe deux types de drainage : le drainage superficiel, réalisé à travers des fossés, et le drainage souterrain, effectué avec des tuyaux perforés enterrés.

Les **drains** sont des ouvrages qui interceptent et dirigent l'eau vers un exutoire, tandis que les **fossés** sont des canaux ouverts qui drainent les eaux de surface.

Les pratique de drainage en zone humide

Les pratiques de drainage agricole se sont intensifiées récemment, facilitées par le développement de l'industrie agricole et l'accès plus facile et abordable aux outils de drainage (Blann et al., 2009). Le drainage permet d'améliorer l'accès aux champs et la productivité en contrôlant le niveau d'eau dans le sol (Durand-Claye, 1890). Cependant, la demande croissante en terres agricoles pousse à exploiter les zones humides, malgré leurs fonctions naturelles.

Typologie des zones Humides

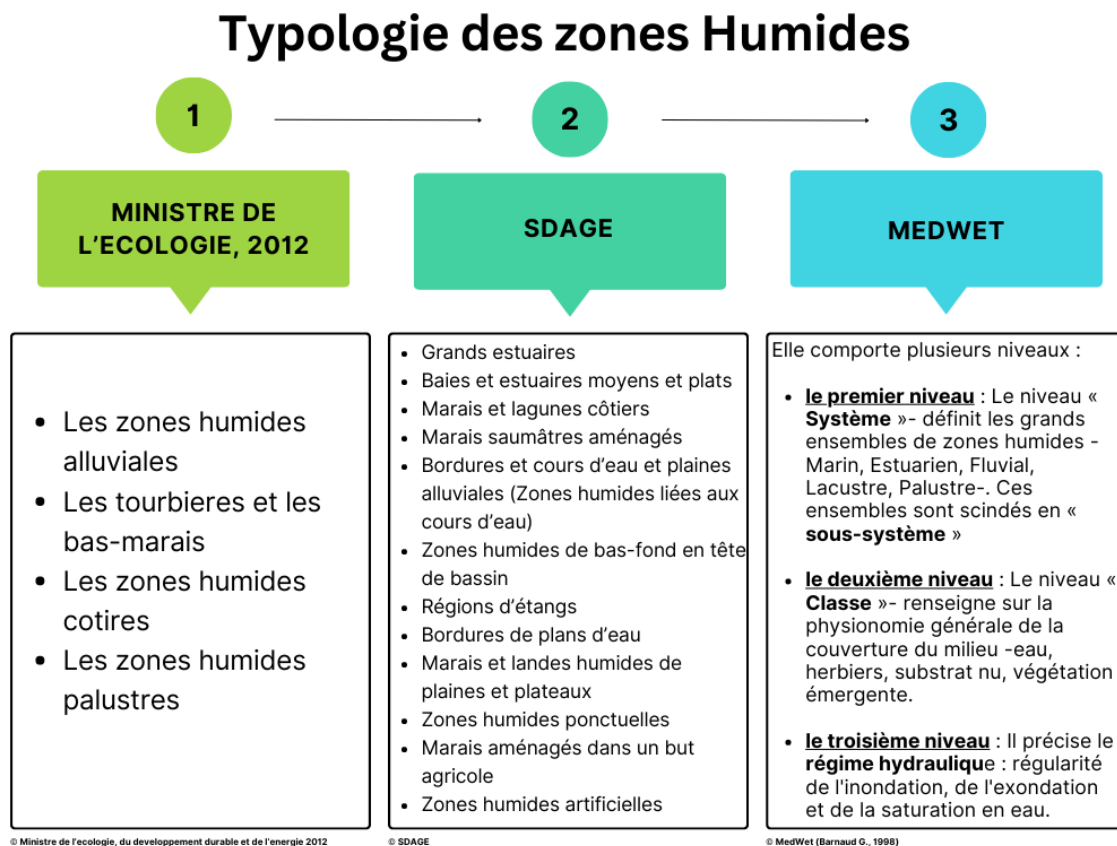


Figure 5: Typologie des Zones Humides (ecologie.gouv.fr)

Classification des zones humides selon la méthode MedWet est faite par Barnaud & naturelle (1998).

Outils et méthode

Approche

Dans le cadre d'une collaboration entre l'INRAE et l'OFB, ce projet bénéficie des ressources humaines et matérielles des deux organismes, y compris leurs bases de données respectives. Cette collaboration vise à favoriser une meilleure compréhension et appropriation du sujet traité.

L'objectif de cette étude est de créer une méthode d'évaluation simplifiée de l'impact du drainage agricole sur les zones humides en France. En exploitant des informations déjà disponibles, telles que les caractéristiques du sol, les dimensions des ouvrages de drainage et la topographie, cette méthode permettra d'évaluer cet impact. Le stage consiste à développer cette méthode et à tester sa sensibilité en fonction de différents paramètres. Il est crucial de définir un niveau de précision acceptable pour chaque paramètre afin d'assurer la fiabilité et la solidité de la méthode, rendant ainsi l'outil utilisable en pratique. La **Figure 6** explique le plan de travail de cette étude .

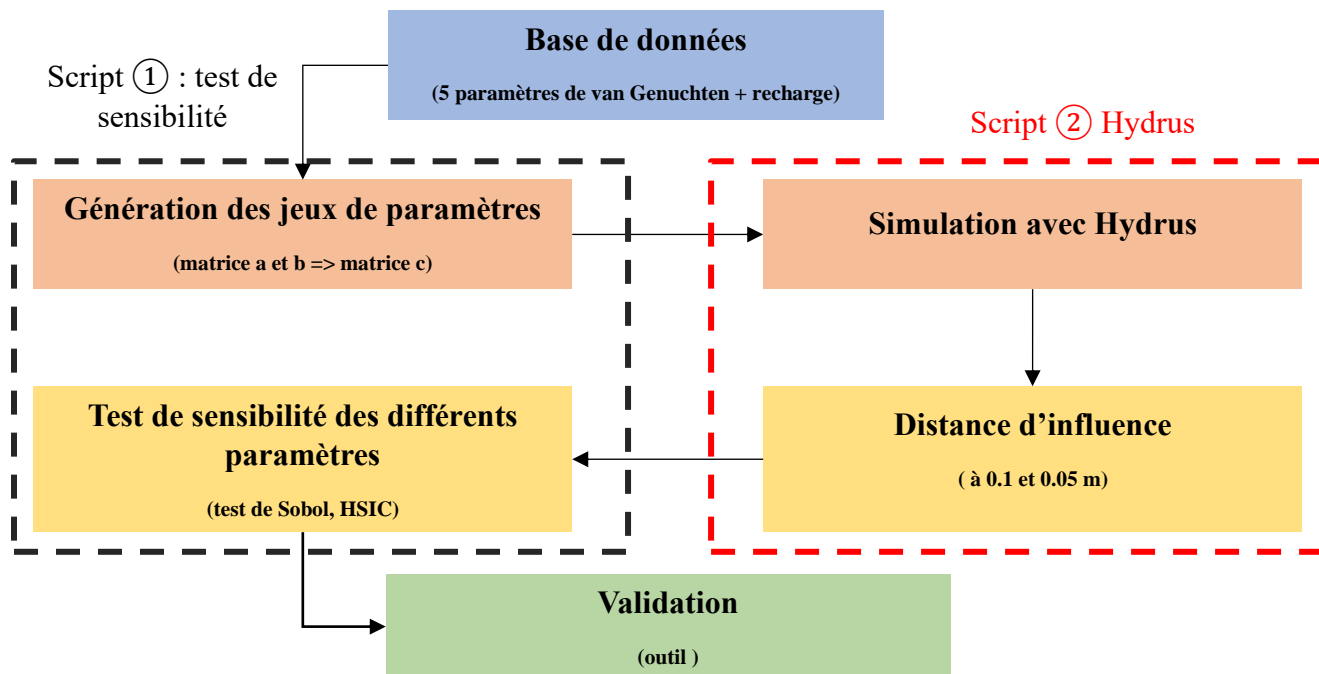


Figure 6 : Structure de l'étude et démarche à suivre

La modélisation des transferts d'eau dans le sol est cruciale pour comprendre les excès d'eau dans différentes zones humides, sous l'influence du drainage agricole. Elle permet de simuler les modifications hydriques après aménagement, en se basant sur les caractéristiques du sol et les conditions limites spécifiques (présence d'un drain enterré ou d'un fossé à ciel ouvert) . L'outil de modélisation HYDRUS-2D a été utilisé pour conceptualiser et valider le modèle, en se référant aux observations sur le terrain. Cette approche facilitera l'analyse et la simulation des variations hydriques dans les zones humides, tout en permettant l'application du modèle sur d'autres zones similaires en ajustant les paramètres du sol.

Langage de programmation R

Le langage R est un langage de programmation très populaire dans le domaine de l'analyse des données et de la statistique (Goulet, 2012). Il offre de nombreuses fonctionnalités et une grande flexibilité pour traiter et analyser les données. Dans le cadre de mon stage, j'ai utilisé des scripts R pour exploiter, créer et manipuler des fichiers et des dossiers de données. Ces scripts ont été essentiels pour organiser les données, effectuer des analyses statistiques avancées et générer des visualisations graphiques. De plus, j'ai utilisé plusieurs packages R tels que hydroGOF (Zambrano-Bigiarini et al., 2020), sensitivity (Iooss et al., 2023) et akima (code (TOMS 760 et al., 2022), qui fournissent des outils spécifiques pour évaluer la performance des modèles hydrologiques, analyser la sensibilité des paramètres et réaliser des interpolations spatiales.

Les scripts R utilisés lors du stage sont basés sur des scripts déjà réalisés pour d'autres projets par INRAE. Le but était d'adapter et de compléter les scripts existants, tout en créant de nouveaux scripts nécessaires. Il y avait deux scripts principaux : le premier pour la création des matrices et des jeux de paramètres d'entrée, ainsi que pour effectuer les tests de sensibilité. Le deuxième script était utilisé pour la création des différentes configurations des systèmes de drainage à traiter (**Figure 8**). Pour chaque configuration, le script permettait de générer des fichiers contenant les sorties de la simulation Hydrus, ainsi qu'un fichier contenant les distances latérales, également appelées distances d'impact des réseaux de drainage.

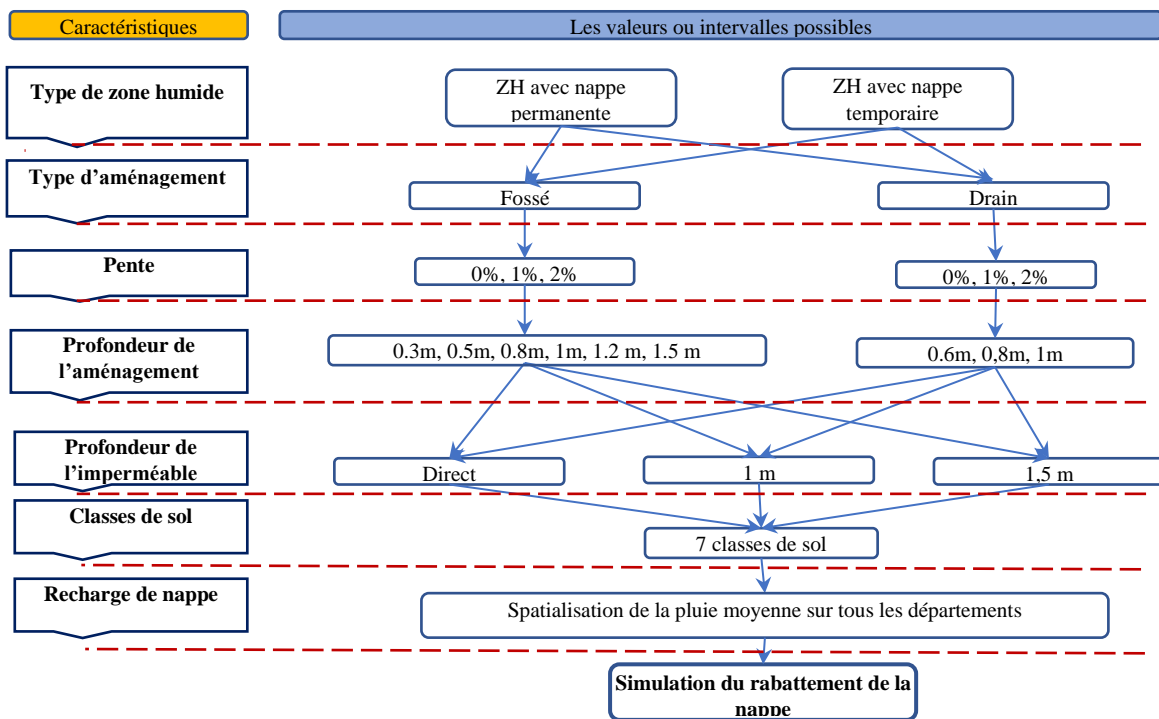


Figure 8 : Démarche de simulation (réunion INRAE-OFB, le 23/01/2023)

Test de sensibilité

L'analyse de sensibilité d'un modèle ou d'un outil numérique étudie l'influence des paramètres d'entrée sur les variables de sortie. Trois méthodes principales sont utilisées : les analyses locales One-at-a-time (OAT), les analyses de Crible (screening) et les analyses globales (GSA) basées sur la décomposition de la variance (Gatel, 2018). Le choix de la méthode dépend des objectifs et du type de modèle.

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact du drainage sur la courbe de rabattement de la nappe en zones humides, une analyse de sensibilité des paramètres d'entrée permettra d'identifier leur influence. Des études antérieures ont examiné la sensibilité des paramètres hydrodynamiques du modèle Hydrus 2D/3D pour divers objectifs tels que la modélisation du transfert des pesticides (Cheviron & Coquet, 2009), la recharge de la nappe souterraine (Leterme et al., 2012) et l'écoulement de subsurface (Rocha et al., 2006).

Test de Sobol

Les méthodes globales, comme celle de Sobol (Sobol I.M, 1993), décomposent la variance pour comprendre comment les différentes entrées contribuent aux résultats du modèle. Pour réaliser ces analyses de sensibilité, le package "sensitivity" de R sera utilisé lors du stage. Les fonctions soboljansen (Jansen, 1999 ; Saltelli et al., 2010) et sobolmartinez (Martinez et al., 2016), permettent de calculer les indices de sensibilité de premier ordre et les indices de sensibilité totale des paramètres. La fonction sobolmartinez a été préférée pour sa capacité à gérer les valeurs manquantes, mais elle nécessite un grand nombre de simulations, ce qui peut être coûteux en termes de ressources numériques.

Test HSIC

L'analyse de sensibilité classique de Sobol, qui se base sur la décomposition de la variance de la sortie, est souvent utilisée pour ce type d'étude. Cependant, lorsque l'échantillon d'apprentissage est de petite taille, il devient difficile d'estimer avec précision les indices correspondants (Sarazin et al., 2022). Afin de contourner cette difficulté, il est de plus en plus courant d'utiliser la mesure de sensibilité basée sur le critère d'indépendance de Hilbert-Schmidt (HSIC). Cette mesure est appliquée à chaque paire entrée-sortie, ce qui permet de générer une collection d'indices HSIC. Bien que leur interprétation soit moins intuitive que celle des indices de Sobol, leur construction repose sur la théorie des espaces de Hilbert à noyaux reproduisants (Gretton et al., 2005).

Données disponibles

Les paramètres nécessaires pour mener à bien le travail demandé sont les paramètres hydrauliques et hydrodynamiques du sol, ainsi que les paramètres de l'équation de van Genuchten (Eq.2) et (Eq.3) (Van Genuchten, 1980). Ces paramètres comprennent la conductivité hydraulique (K_s), la teneur en eau à saturation (θ_s), la teneur en eau résiduelle (θ_r), le paramètre alpha (α) de la courbe de rétention d'eau dans le sol, le paramètre n de cette même courbe, et la recharge (R).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(1 + |\alpha h|^{1/(1-m)}\right)^{-m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (Eq. 2)$$

Où, θ_r est la teneur en eau résiduelle (-), θ_s est la teneur en eau à saturation (-), h est le potentiel de pression (m), α est un paramètre empirique (m^{-1}), n est un paramètre empirique (supérieur à 1) (-), $m = 1 - (1/n)$, est un paramètre empirique (-)

$$k(h) = \begin{cases} k_s \cdot Se^l \cdot \left(1 - \left(1 - Se^{1/m}\right)^m\right)^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (Eq. 3)$$
$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Où, K_s est la conductivité à saturation ($m.s^{-1}$), Se est la saturation effective (-), l est le coefficient de connexion des pores (-), égal à 0,5 (valeur proposée par (Mualem, 1976)).

Afin de générer et exploiter les données, il est important de connaître la distribution statistique de chacun de ces paramètres. Une recherche bibliographique a été effectuée à cet effet. Selon Warrick & Nielsen (1980), la variabilité spatiale des propriétés physiques statiques du sol est généralement ajustée à des distributions de probabilité normales, tandis que les propriétés dynamiques liées au mouvement de l'eau ou des solutés sont généralement distribuées selon une loi log-normale.

Par exemple, la conductivité hydraulique à saturation K_s suit une distribution log-normale selon plusieurs références (Kosugi, 1999 ; Mohanty et al., 1994 ; Schaap & van Genuchten, 2006 ; Sisson & Wierenga, 1981). Tandis que les variables "statiques" telles que la densité apparente et la teneur en eau à saturation et les paramètres de Van Genuchten (n , α) suivent une distribution normale (Gascuel-Odoux, 1987)

Gatel (2018) a également observé que la distribution des valeurs de conductivité hydraulique à saturation suit une loi log-normale avec un écart-type égal à la moyenne, lorsque les informations disponibles sont insuffisantes, tandis que la porosité et les paramètres de van Genuchten suivent une loi normale (**Annexes B**).

Dans leur ouvrage "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics", Carsel & Parrish (1988) ont utilisé une base de données des conductivités hydrauliques saturées calculées (K_s) et des paramètres de rétention d'eau de van Genuchten (n , α) pour les différentes classifications texturales des sols (12 classes en États-Unis). Cette étude visait à caractériser les distributions de probabilité associées à ces variables. Dans notre cas, nous allons exploiter les données spécifiques relatives à la texture limono-argileuse (**Tableau 2**), pour les autres classes texturales, voir l'**Annexes C**.

Tableau 2 : Densités de probabilité des paramètres sélectionnés pour sol limono-argileux. Les fonctions sont décrites par leur moyenne μ et leur variance σ pour les lois LN (log-normale) et N (normale), et par le minimum et le maximum pour la loi U (Uniforme)

Parametres	Conductivité à sat. horizontale	Teneur en eau à saturation	Teneur en eau résiduelle	Paramètres de Van Genuchten		Recharge
	Ks	θ_s	θ_r	α	n	R
Unité	cm.h ⁻¹	-	-	cm ⁻¹	-	mm.j ⁻¹
distribution	LN	N	N	N	N	U
moyenne	0.26	0.38	0.1	0.019	1.31	-
variance	0.7	0.05	0.013	0.015	0.09	-
max	7.5		0.12	0.15	2	5
min	0	0	0	0	1	1

Résultats et discussion

Etape 1 : Génération des jeux de paramètres

À partir des données présentées dans le **Tableau 2**, les densités de probabilité des paramètres sélectionnés (K_s , θ_s , θ_r , α , n , R , l) ont été utilisées pour créer des jeux de paramètres, 100 valeurs pour chaque paramètres, à l'aide du Script ① : test de sensibilité (la partie du script R dans l'**Annexes D**), avec une valeur de l constante de 0.5 , Finalement, nous avons obtenu une matrice finale de jeux de paramètres comprenant $(p + 2).n = 900$ valeurs.

Avec :

p : nombre de paramètres (K_s , θ_s , θ_r , α , n , R , l)

n : nombre de valeurs souhaitées par paramètre (100)

La **Figure 9** présente l'algorithme qui permet de générer systématiquement tous les jeux de paramètres souhaités pour cette étape.

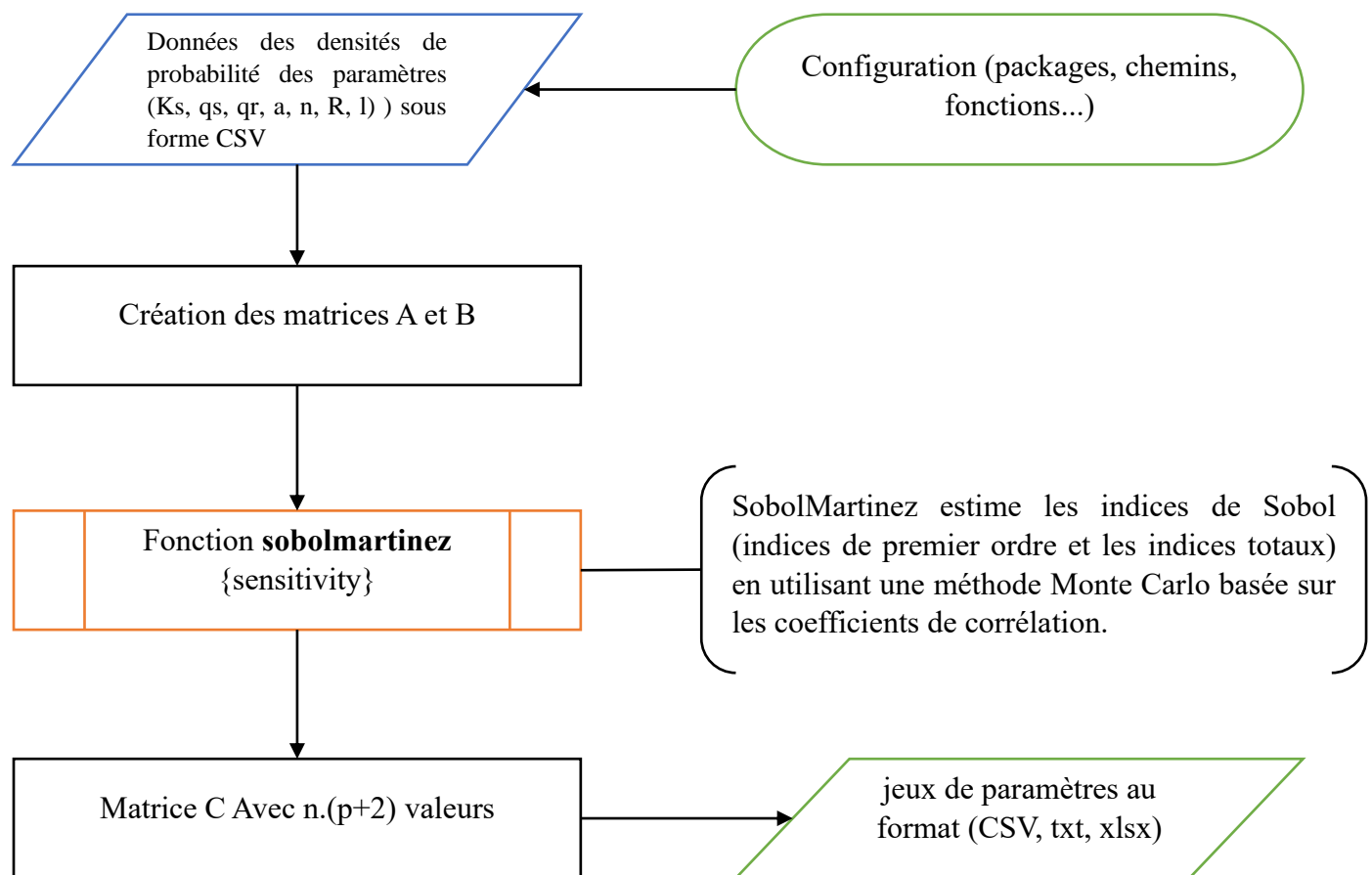


Figure 9 : L'algorithme pour la création des jeux de paramètres (Etape 1)

Les jeux de paramètres obtenus sont représentés sous forme d'une matrice de 900 lignes et 7 colonnes :

$$C(900,7) = \begin{bmatrix} Ks & \theta r & \theta s & n & \alpha & R & l \\ 1.978 & 0.111 & 0.421 & 1.549 & 0.00025 & 3.388 & 0.5 \\ 2.067 & 0.091 & 0.353 & 1.258 & 0.00019 & 2.505 & 0.5 \\ 0.794 & 0.106 & 0.294 & 1.451 & 0.01522 & 3.833 & 0.5 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 1.101 & 0.105 & 0.403 & 1.179 & 0.00436 & 3.854 & 0.5 \\ 0.911 & 0.119 & 0.450 & 1.293 & 0.00436 & 4.597 & 0.5 \\ 1.276 & 0.112 & 0.390 & 1.230 & 0.00443 & 2.424 & 0.5 \end{bmatrix}$$

En raison de contraintes de temps et pour respecter les délais impartis, nous avons décidé de prendre initialement seulement 200 lignes aléatoires de la matrice afin de procéder aux étapes suivantes. Dans un premier temps, nous avons effectué des simulations à l'aide du script Hydrus en utilisant ces 200 jeux de paramètres. Ensuite, nous avons extrait les distances d'influence latérale correspondantes à ces simulations. Cependant, pour réaliser un test de sensibilité HSIC ou Sobol et évaluer l'impact des variations des paramètres sur la distance d'influence latérale, il est recommandé d'avoir un minimum de 900 simulations. Par conséquent, les résultats de ces tests seront présentés dans le rapport final en raison des contraintes de temps.

Etape 2 : Simulation avec script Hydrus

Cette étape consiste à exploiter les résultats de l'étape 1 comme données et à créer des fichiers de simulation Hydrus à l'aide du Script 2 : « Hydrus », en suivant l'algorithme présenté dans la Figure 10:

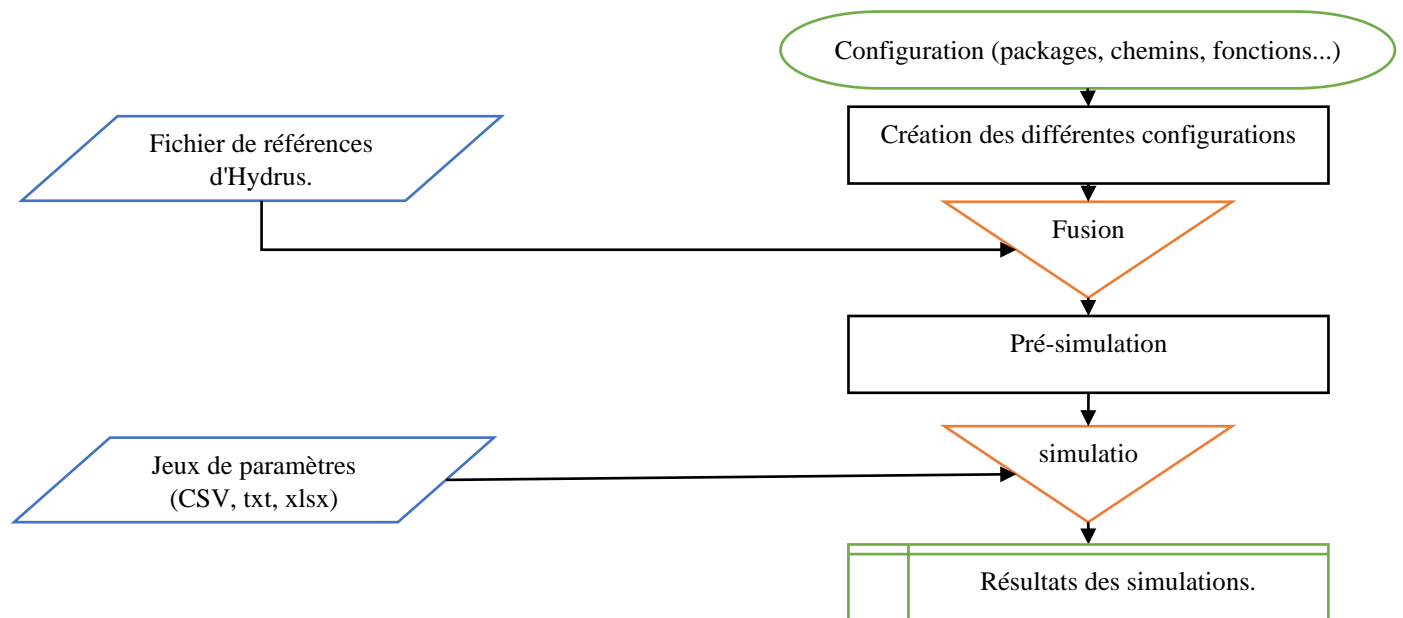


Figure 10 : algorithme de simulation avec le script Hydrus (étape 2)

Cette étape implique de prendre chaque configuration donnée et d'utiliser les fichiers de référence d'Hydrus qui ont déjà été copiés. Ces fichiers sont au format .IN et sont utilisés pour effectuer des simulations avec chaque jeu de paramètres (chaque ligne de la matrice). Les résultats des simulations sont ensuite stockés dans des fichiers .OUT. Ces fichiers seront exploités dans l'étape suivante pour les visualiser et les analyser.

Etape 3 : Distance d'influence

Après avoir réalisé les simulations et stocké les résultats sous forme de fichiers .OUT, cette étape, illustrée dans la **Figure 11**, vise à exploiter les fichiers .OUT. Dans un premier temps, les résultats sont utilisés pour visualiser l'allure du rabattement des nappes d'eau en présence d'un système de drainage, à l'aide de graphiques ou d'abaques (**Figure 12**). Ces représentations permettent de mieux comprendre l'impact du drainage sur le niveau des nappes et d'observer les variations dans différentes situations. Dans un deuxième temps, la distance latérale d'influence est extraite à des profondeurs de 10 cm et 5 cm sous la surface du sol (**Tableau 3**).

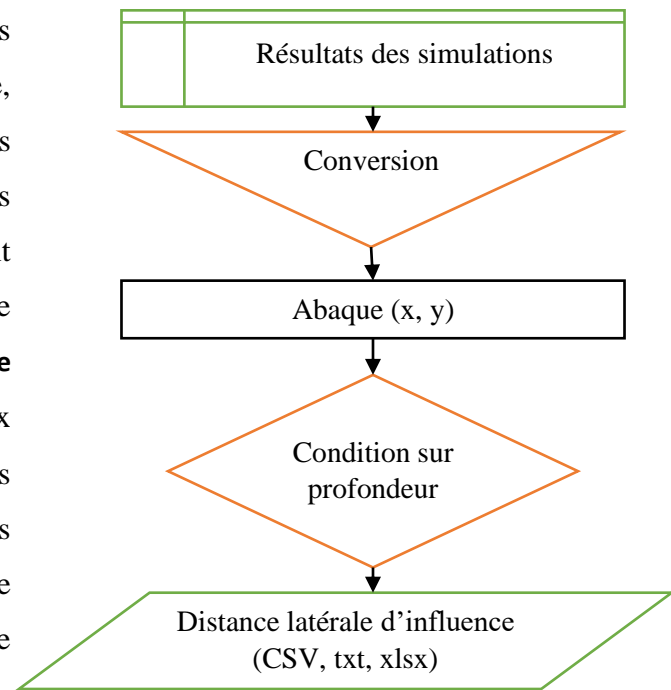


Figure 11 : Algorithme pour calcul de la distance d'influence (Etape 3)

Tableau 3 représente quelques résultats des distances latérales d'influence d'un système de drainage en fonction des jeux de paramètres d'entrée :

Tableau 3 : Exemple des résultats de calcul de la distance latérale d'influence

sol	θ_r	θ_s	a	n	Ks	l	R	D0.1	D0.05
1	0.104	0.37	0.0087	1.22	0.0049	0.5	4.19	2.85	3.71
9	0.106	0.31	0.006	1.26	0.0089	0.5	3.24	5.11	6.51
21	0.067	0.43	0.0206	1.28	0.0027	0.5	4.51	1.71	2.25
73	0.083	0.3	0.0284	1.33	0.0407	0.5	4.08	10.7	13.28
85	0.067	0.42	0.0206	1.28	0.0027	0.5	3.96	1.89	2.49
88	0.074	0.4	0.0451	1.4	0.003	0.5	3.19	2.41	3.17
113	0.078	0.42	0.0058	1.29	0.0039	0.5	4.62	2.31	3.01
153	0.107	0.37	0.0337	1.42	0.0026	0.5	1.48	3.79	5.05
196	0.112	0.39	0.0264	1.37	0.0037	0.5	3.44	2.75	3.59
200	0.08	0.33	0.0028	1.49	0.0216	0.5	4.05	7.81	9.75

D'après les résultats présentés dans le **Tableau 3**, on peut observer que le sol 73 présente la plus grande distance d'influence, ce qui est attribué à une combinaison de paramètres avec une valeur élevée de K_s . En revanche, les sols 21 et 85 ont une distance d'influence plus faible, ce qui est associé à une valeur plus faible de K_s . Cependant, pour une interprétation plus complète, il est nécessaire de réaliser un test de sensibilité, qui constitue l'objectif de l'étape 4 de ce projet.

La **Figure 12** présente quelques exemples d'abaques qui permettent de visualiser le rabattement des nappes d'eau en présence d'un système de drainage et d'évaluer les distances d'influence correspondantes à une certaine profondeur.

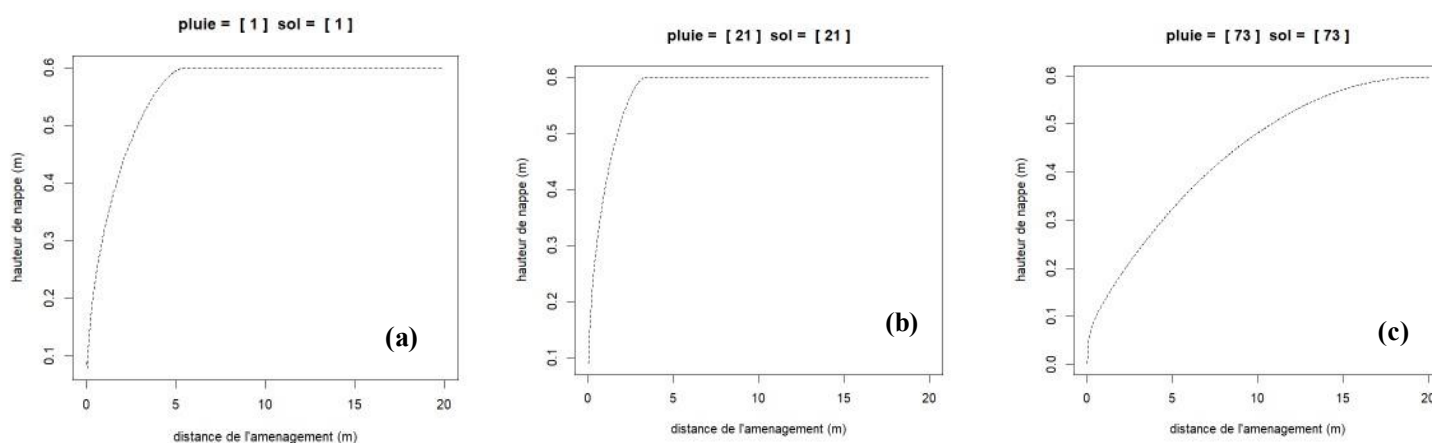


Figure 12 : Exemple des abaques*

*(a) L'abaque représentant la première ligne du **Tableau 3**, (b) L'abaque correspondant à la plus petite distance latérale d'influence, (c) L'abaque correspondant à la plus grande distance latérale d'influence.

À partir de ces exemples, il est observé que l'influence d'un système de drainage varie en fonction des jeux de paramètres, notamment les caractéristiques du sol, les paramètres hydrodynamiques et la recharge. Cela souligne l'importance de réaliser un test de sensibilité des paramètres d'entrée sur cette distance latérale.

Etape 4 : Test de sensibilité des différents paramètres

Ce test permet d'évaluer comment les variations des paramètres affectent la distance latérale d'influence, il permet également de déterminer les paramètres les plus influents et de mieux comprendre les interactions entre les différents facteurs. Ces informations sont nécessaires pour adapter la modélisation en fonction des données disponibles et garantir des résultats fiables et pertinents.

Dans cette étape 4, nous avons décidé de réaliser deux tests de sensibilité, à savoir les tests Sobol et HSIC. Le choix entre ces deux tests dépend à la fois de l'effectif des jeux de paramètres et du temps disponible pour les analyses. La **Figure 13** schématise cette approche et illustre la séquence des étapes à suivre pour mener à bien ces tests.

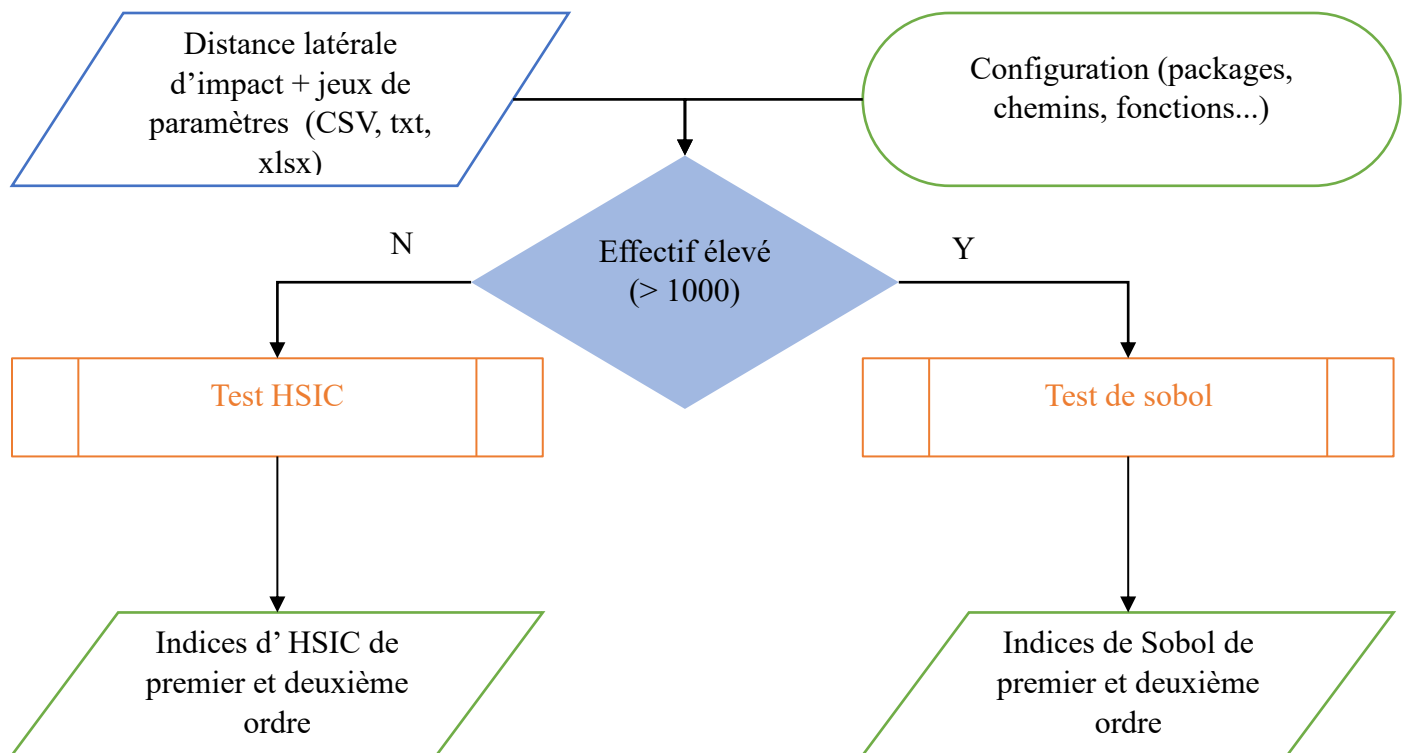


Figure 13 : Algorithme pour réaliser test de sensibilité (Etape 4)

En raison de contraintes de temps et pour respecter les délais d'envoi du rapport, nous avons opté pour une approche de test de sensibilité manuelle pour cette étape 4. Nous avons effectué le test de sensibilité sur un sous-ensemble de 200 échantillons sélectionnés, en nous concentrant sur la distance latérale d'influence à 10 cm (D0.1). Les résultats de ce test sont présentés dans les (Figure 14 , Figure 15 , Figure 16).

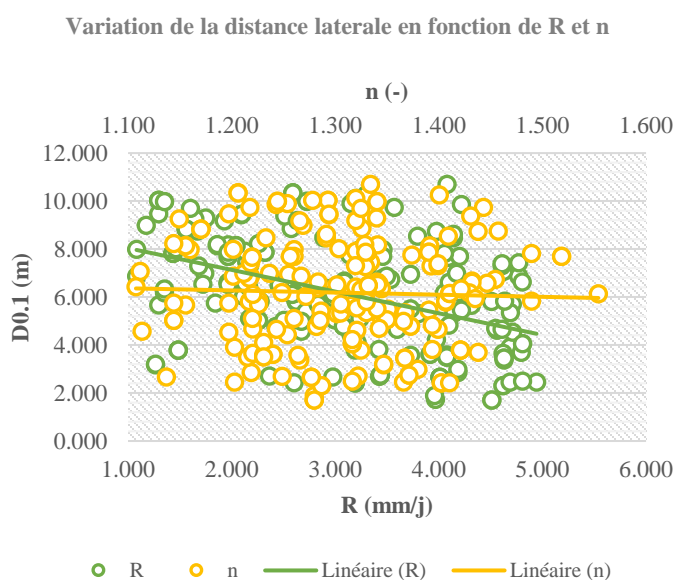


Figure 14 : Variation de distance latérale en fonction de R et n

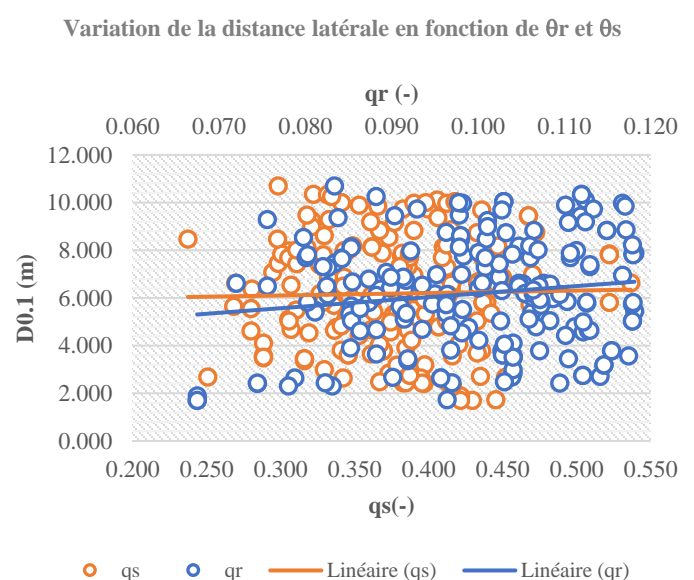


Figure 15 : Variation de distance latérale en fonction de θ_r et θ_s

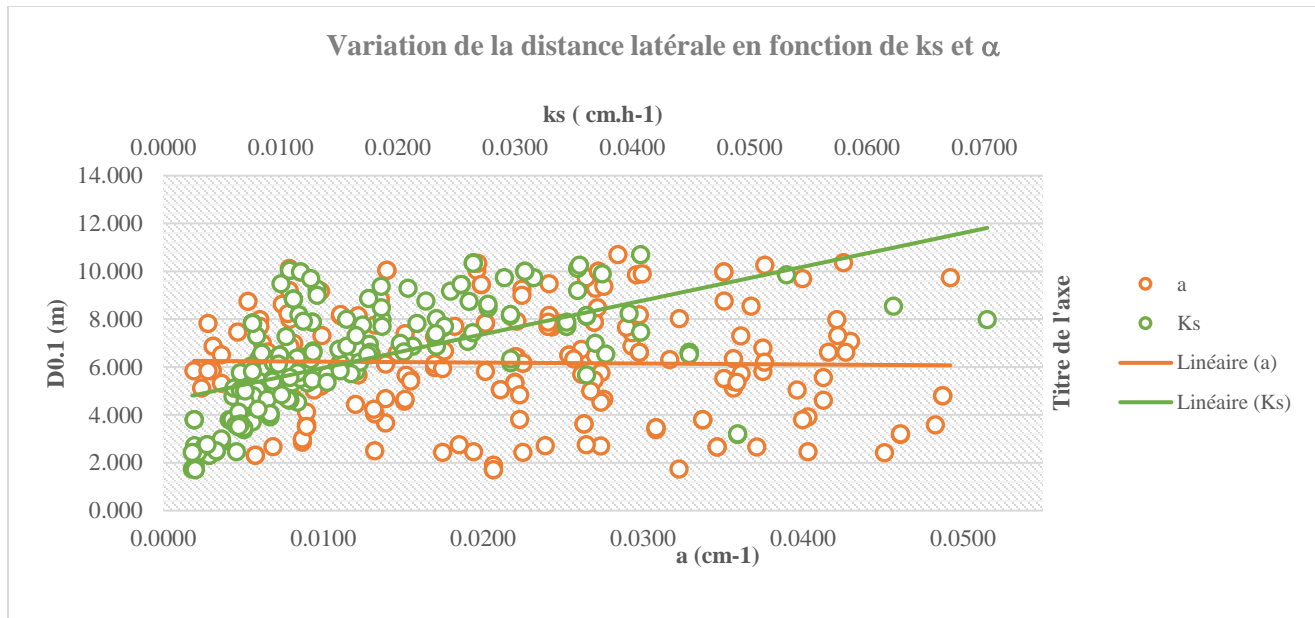


Figure 16 : Variation de distance latérale en fonction de k_s et α

Selon les résultats des tests de sensibilité présentés dans les **Figure 14**, **Figure 15** et **Figure 16**, il est clair, à partir des droites de régression, que la perméabilité à saturation (k_s) et la recharge (R) sont les paramètres les plus sensibles. Ensuite, le paramètre " α " de Van Genuchten et la teneur en eau résiduelle montrent également une sensibilité assez importante. En revanche, les autres paramètres tels que la teneur en eau à saturation semblent avoir moins d'influence sur les variations du rabattement de la nappe.

Pour illustrer le cas de la perméabilité à saturation (K_s), nous avons tracé des courbes du rabattement de la nappe pour différentes valeurs de K_s en présence d'un système de drainage (**Figure 17**). Nous constatons que plus la valeur de K_s augmente, plus les variations de la profondeur de la nappe sont importantes. Cela indique clairement que la sensibilité des résultats est étroitement liée à la perméabilité à saturation.

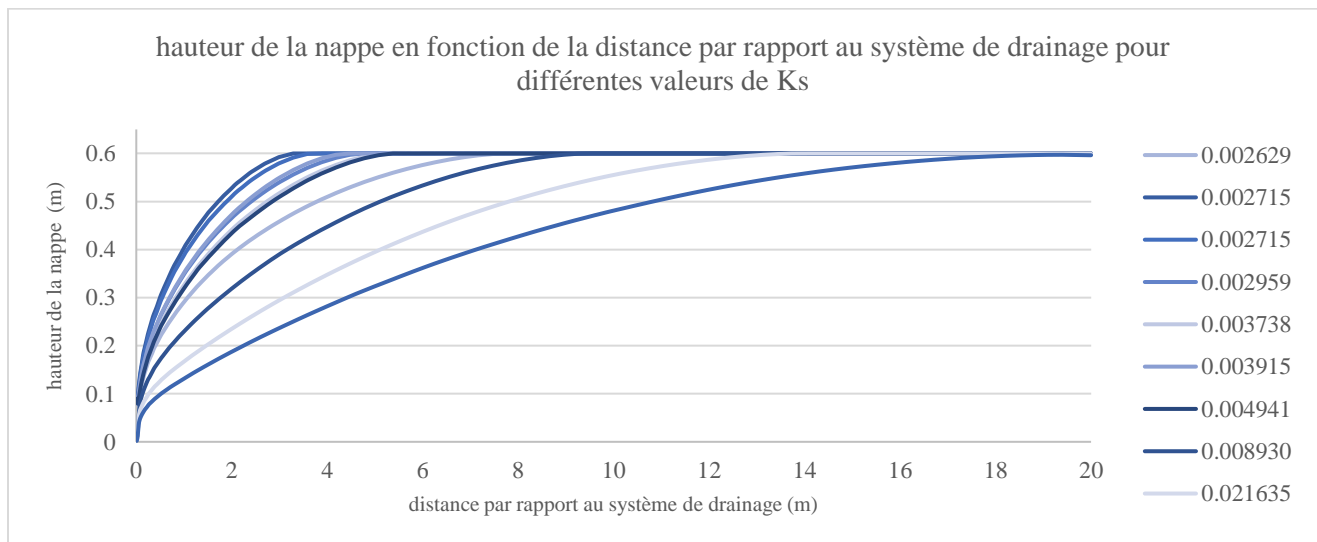


Figure 17 : hauteur de la nappe en fonction de la distance par rapport au système de drainage pour différentes valeurs de K_s

Un test HSIC a été réalisé sur R en utilisant le script fourni dans l'**Annexes E**. Même avec un échantillon de taille inférieure à 800 valeurs par paramètre, nous avons obtenu les résultats présentés dans la **Figure 18**. Ces résultats mettent en évidence la dépendance entre la perméabilité à saturation et la recharge avec la distance latérale d'influence du système de drainage.

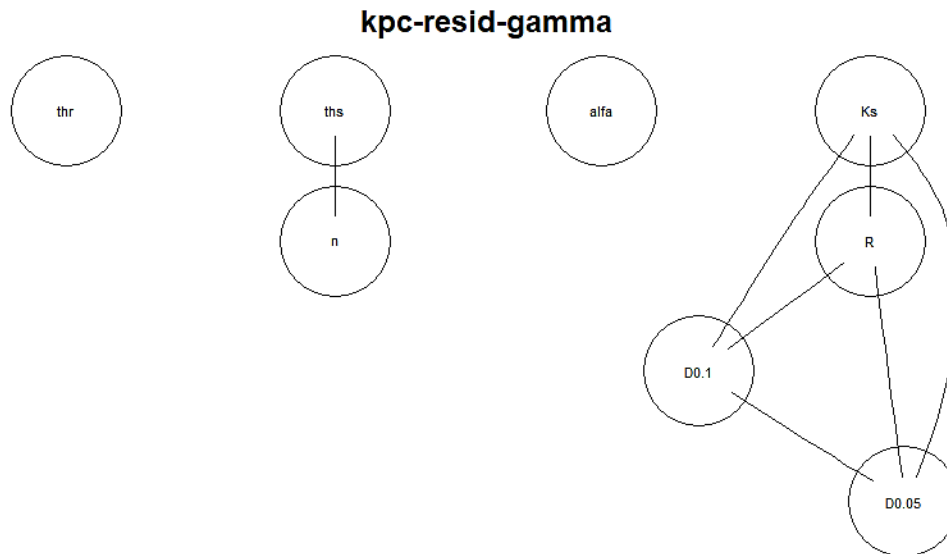


Figure 18 : HSIC-résiduels (test gamma)

Pour approfondir cette dépendance et confirmer nos résultats, L'indice de corrélation est calculé entre chaque paire de paramètres (K_s , θ_s , θ_r , n , α , R) et la distance d'influence ($D_{0.05}$ et $D_{0.1}$). Le **Tableau 4** résume les résultats.

Tableau 4 : L'indice de corrélation entre chaque paire de paramètres d'entrée et la distance d'influence

	θ_r	θ_s	α	n	K_s	R
$D_{0.05}$	0.155	0.031	-0.012	-0.026	0.678	-0.527
$D_{0.1}$	0.146	0.025	-0.021	-0.034	0.563	-0.439

Conclusion

L'objectif de ce projet est de développer un nouvel outil pour évaluer l'impact réel d'un système de drainage conformément à la législation sur l'eau, en particulier en cas de suspicion d'infraction dans les zones humides. La méthode choisie doit être technique, robuste, fiable et facile à utiliser par les inspecteurs de l'environnement. Dans cette perspective, nous partons du principe que les phénomènes transitoires complexes des fluctuations de la nappe phréatique dans les zones humides peuvent être simplifiés en une représentation en régime permanent.

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé la modélisation numérique des écoulements souterrains pour étudier l'impact d'un système de drainage agricole sur le rabattement de la nappe en régime permanent. Pour construire un modèle hydrogéologique précis, nous avons pris en compte plusieurs aspects techniques importants. Cela inclut la compréhension des propriétés des sols, la détermination des conditions aux limites et l'estimation de la recharge moyenne de la nappe. Ces informations sont essentielles pour simuler de manière réaliste le comportement de la nappe dans un contexte de drainage agricole.

Dans ce stage, nous avons étudié différentes configurations de zones humides en variant les paramètres hydrodynamiques des sols, les caractéristiques statiques du sol et la recharge moyenne de la nappe. Pour simuler les écoulements de la nappe dans ces zones, nous avons utilisé le modèle Hydrus (2D/3D). Les résultats de la modélisation ont été enregistrés sous forme d'abaques représentant le rabattement de la nappe causé par la présence d'un drain ou d'un fossé.

En utilisant cette courbe, il est possible de calculer la distance latérale d'impact en fonction des conditions initiales du toit de la nappe avant le drainage.

Les tests de sensibilités réalisés dans le cadre de ce stage montrent que la perméabilité à saturation et la recharge sont les paramètres les plus sensibles pour simuler la forme la nappe en régime permanent avec le logiciel Hydrus 2D/3D. Le paramètre " α " de la courbe de rétention est également sensible.

En perspective de ce travail, il serait intéressant d'étudier la sensibilité des autres paramètres liés au profil topographique étudié, tels que la pente, les dimensions et la profondeur des drains, ainsi que l'écartement entre les drains. Cette étude permettrait de déterminer les paramètres les plus influents, pour lesquels il faudrait réduire les intervalles de valeurs afin de réduire les incertitudes de simulation, et les paramètres moins influents, pour lesquels les efforts de calage de paramètres peuvent être moins importants (par exemple en choisissant une valeur constante).

Références bibliographiques

- Amatya, D. M., Cbescheir, M., & Skaggl, R. W. (1995). *Hydrologic Effects of Wetland Location and Size in an Agricultural Landscape*.
- Ammann, Smith. (1995). *An Approach for Assessing Wetland Functions Using Hydrogeomorphic Classification, Reference Wetlands, and Functional Indices*.
<https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA307121>
- Army. (1987). Corps of Engineers wetlands delineation manual. [U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station], Y-87-1.
- Article L211-1—Légifrance. (2016).
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTIO00041599138
- Article L214-7—Légifrance. (2016).
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTIO00020731290/2011-11-02
- Article R211-108—Légifrance. (2016).
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTIO00006836803
- Barnaud, G., & Fustec, E. (2007). *Conserver les zones humides : Pourquoi ? Comment ?*
- Barnaud, G., & naturelle, M. national d'histoire. (1998). *Conservation des zones humides : Concepts et méthodes appliqués à leur caractérisation*.
- Bedford, B. L. (1999). Cumulative effects on wetland landscapes : Links to wetland restoration in the United States and southern Canada. *Wetlands*, 19(4), 775-788.
<https://doi.org/10.1007/BF03161784>
- Blann, K., Anderson, J., Sands, G., & Vondracek, B. (2009). *Effects of Agricultural Drainage on Aquatic Ecosystems : A Review* [Report]. <http://conservancy.umn.edu/handle/11299/183566>
- Brinson, M. M. (1933). *A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands*.
- Brinson, M. M., & Malvárez, A. I. (2002). Temperate freshwater wetlands : Types, status, and threats. *Environmental Conservation*, 29(2), 115-133.
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.
<https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755>
- CEMAGREF Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, A. (FRA), & CEMAGREF Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony (FRA). (1990). *Annales 1989, département forêt*. CEMAGREF Editions.
- Cheviron, B., & Coquet, Y. (2009). Sensitivity Analysis of Transient-MIM HYDRUS-1D: Case Study Related to Pesticide Fate in Soils All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher. *Vadose Zone Journal*, 8(4), 1064-1079.
<https://doi.org/10.2136/vzj2009.0023>
- Cizel, O. (2017). Zones humides : L'évolution du cadre juridique. *Sciences Eaux & Territoires*, 24, Article 24.
<https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2017.24.05>
- code (TOMS 760, H. A. (Fortran, 761, and 433)), 697, port (interp*, A. G. (R, functions), bicubic*, code), bilinear, function), T. P. (aspline, enhancements), M. M. (interp2xyz function +, Machinery, Y. A. for C., TOMS 760, I. (covers code from, 761, & and 433), 697. (2022). *akima : Interpolation of Irregularly and Regularly Spaced Data* (0.6-3.4).
<https://cran.r-project.org/web/packages/akima/index.html>
- Crossley, K., & Reynolds, D. D. (2005). *A Comparison of Models for Simulating Deep Ditch Drainage in the Perth Coastal Plain*.
- Delecour, F. (1978). *Initiation à la pédologie*. : Faculté des Sciences Agronomiques. Service de la Science du Sol.
- Dhatt, G., & Touzot, G. (1981). *Une présentation de la méthode des éléments finis*. Presses Université Laval.
- Durand-Claye, A. (1841-1888) A. du texte. (1890). *Hydraulique agricole et génie rural : Leçons professées à l'École des ponts et chaussées. Tome 1 / par Alfred Durand-Claye,... ; et rédigées par M. Félix Launay,... ; [préfaces de Mme Ernestine Durand-Claye et de M. Mille]*.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6253041x>
- ecologie.gouv.fr. (2023, avril 3). *Gestion de l'eau en France*. Ministères Écologie Énergie Territoires.
<https://www.ecologie.gouv.fr/gestion-leau-en-france>
- Galerkin Method—An overview | ScienceDirect Topics. (s. d.). Consulté 4 juin 2023, à l'adresse <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/galerkin-method>
- Gascuel-Odoux, C. (1987). Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, méthodes et résultats ; cas d'une seule variable : Revue bibliographique. *Agronomie*, 7(1), 61-71.
<https://doi.org/10.1051/agro:19870108>
- Gatel, L. (2018). *Construction et évaluation d'un modèle de transport de contaminants réactif couplé surface-subsurface à l'échelle du versant* [Phdthesis, Université Grenoble Alpes ; Institut national de la recherche scientifique (Québec, province)].
<https://theses.hal.science/tel-02607327>
- Gayet, G., Baptist, F., Baraille, L., Caessteker, P., Clément, C., Gaillard, J., Gaucherand, S., Isselin, F., Poinot, C., Quétier, F., Touroult, J., & Barnaud, G. (2016). *Méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides*. 312.
- Goulet, V. (2012). *Introduction à la programmation en R* (Troisième édition). Vincent Goulet.
- Gretton, A., Bousquet, O., Smola, A., & Schölkopf, B. (2005). Measuring Statistical Dependence with Hilbert-Schmidt Norms. In S. Jain, H. U. Simon, & E. Tomita (Éds.), *Algorithmic Learning Theory* (Vol. 3734, p. 63-77). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11564089_7
- Hill, M. C., Banta, E. R., Harbaugh, A. W., & Anderman, E. R. (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model; user guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs. In *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model; user guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs* (USGS Numbered Series N° 2000-184; Open-File Report, Vol. 2000-184, p. 219). U.S. Geological Survey.
<https://doi.org/10.3133/ofr00184>
- Holden, J., Chapman, P., & Labadz, J. (2003). Artificial drainage of peatlands : Hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. *Progress in Physical Geography*, 28.
<https://doi.org/10.1191/0309133304pp403ra>
- INRAe. (2021). *Guide_INRAe*.
- Iooss, B., Veiga, S. D., Pujol, A. J. and G., Broto, with contributions from B., Boumhaout, K., Delage, T., Amri, R. E., Fruth, J., Gilquin, L., Guillaume, J., Herin, M., Idrissi, M. I., Gratiot, L. L., Lemaitre, P., Marrel, A., Meynaoui, A., Nelson, B. L.,

- Monari, F., Oomen, R., ... Weber, F. (2023). *sensitivity : Global Sensitivity Analysis of Model Outputs* (1.28.1). <https://cran.r-project.org/web/packages/sensitivity/index.html>
- J. Å imunek, M. Th. Van Genuchten, & M. Å ejna. (2012). HYDRUS : Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1263-1276. <https://doi.org/10.13031/2013.42239>
- J. Šimunek, M. Th. van Genuchte, & M. Šejna. (2022). *Manual HYDRUS-2D*. Department of Environmental Sciences University of California Riverside.
- Jansen, M. J. W. (1999). Analysis of variance designs for model output. *Computer Physics Communications*, 117(1), 35-43. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(98\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(98)00154-4)
- Kosugi, K. (1999). General Model for Unsaturated Hydraulic Conductivity for Soils with Lognormal Pore-Size Distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 63(2), 270-277. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300020003x>
- Lemly, A. D., Kingsford, R. T., & Thompson, J. R. (2000). Irrigated Agriculture and Wildlife Conservation : Conflict on a Global Scale. *Environmental Management*, 25(5), 485-512. <https://doi.org/10.1007/s002679910039>
- Lesaffre, B. (1989). *Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés. Débit de pointe et modèle Sidra : Extension des principes théoriques de Boussinesq et Guyon. Exemple du champ expérimental d'Arrou (Eure et Loir)*. CEMAGREF.
- Leterme, B., Mallants, D., & Jacques, D. (2012). Sensitivity of groundwater recharge using climatic analogues and HYDRUS-1D. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2485-2497. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2485-2012>
- Martinez, J.-M., Baudin, M., Boumhaout, K., Delage, T., & Iooss, B. (2016). Numerical stability of Sobol'indices estimation formula. *Proceedings of the 8th International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output (SAMO 2016)*, 30, 50-51.
- Mohanty, B. P., Kanwar, R. S., & Everts, C. J. (1994). Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Measurement Methods for a Glacial-Till Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 672-677. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030006x>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Rapinel, S., Clément, B., & Hubert-Moy, L. (2019). Cartographie des zones humides par télédétection : Approche multi-échelle pour une planification environnementale. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.31606>
- Rocha, D., Abbasi, F., & Feyen, J. (2006). Sensitivity Analysis of Soil Hydraulic Properties on Subsurface Water Flow in Furrows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(4), 418-424. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:4\(418\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:4(418))
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181(2), 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>
- Sarazin, G., Marrel, A., Veiga, S. da, & Chabridon, V. (2022, juin 13). *Test d'indépendance basé sur les indices HSIC-ANOVA d'ordre total*. 53èmes Journées de Statistique de la SFDs. <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-03701170>
- Schaap, M. G., & van Genuchten, M. Th. (2006). A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation. *Vadose Zone Journal*, 5(1), 27-34. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0005>
- Sheler, R. J. (2013). *The impact of agricultural drainage systems on hydrologic responses* [Master of Science, University of Iowa]. <https://doi.org/10.17077/etd.ohim4tcr>
- Sisson, J. B., & Wierenga, P. J. (1981). Spatial Variability of Steady-State Infiltration Rates as a Stochastic Process. *Soil Science Society of America Journal*, 45(4), 699-704. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500040005x>
- Skaggs, R. W. (1976). Determination of the hydraulic conductivity-drainable porosity ratio from water table measurements. *Trans ASAE Am Soc Agric Eng*. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Determination+of+the+hydraulic+conductivity-drainable+porosity+ratio+from+water+table+measurements&author=Skaggs%2C+R.W.&publication_year=1976
- Skaggs, R. W., Reynolds, W., & Chescheir, G. M. (2002). *Methods to Determine Lateral Effects of a Drainage Ditch on Wetland Hydrology*. 48. <https://doi.org/10.13031/2013.10385>
- Skaggs, R. W., Youssef, M., & Chescheir, G. M. (2012). DRAINMOD : Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55, 1509-1522. <https://doi.org/10.13031/2013.42259>
- Sobol I.M. (1993). Sobol1993.pdf. *MMCE*, 1(4), 407-414.
- Tiner, R. W. (2016). *Wetland Indicators : A Guide to Wetland Formation, Identification, Delineation, Classification, and Mapping, Second Edition* (2^e éd.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315374710>
- Convention Ramsar, (1971).
- Van Genuchten, M. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Science Society of America Journal*, 44. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Ward, J. v., Tockner, K., & Schiemer, F. (1999). Biodiversity of floodplain river ecosystems : Ecotones and connectivity1. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15(1-3), 125-139. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199901/06\)15:1/3<125::AID-RRR523>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199901/06)15:1/3<125::AID-RRR523>3.0.CO;2-E)
- Warrick, A. W., & Nielsen, D. R. (1980). Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field. In *Applications of Soil Physics* (p. 319-344). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>
- Winter, T. C., & LaBaugh, J. W. (2003). Hydrologic considerations in defining isolated wetlands. *Wetlands*, 23(3), 532-540. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0532:HCIDIW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0532:HCIDIW]2.0.CO;2)
- Zambrano-Bigiarini, M., cre, & cph. (2020). *hydroGOF : Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series* (0.4-0). <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/index.html>
- Zanella, A., Jabiol, B., Ponge, J.-F., Sartori, G., Waal, R. de, Delft, B. van, Graefe, U., Cools, N., Katzensteiner, K., Hager, H., Englisch, M., Brêthes, A., Broll, G., Gobat, J.-M., Brun, J.-J., Milbert, G., Kolb, E., Wolf, U., Frizzera, L., ... Langohr, R. (2011). *European Humus Forms Reference Base*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1944.0801>

ANNEXES

ANNEXES A : TYPOLOGIE DES SOLS MINERAUX EN ZONE HUMIDE (BARNAUD & FUSTEC, 2007)	31
ANNEXES B : DENSITES DE PROBABILITE DES PARAMETRES D'ENTREE	32
ANNEXES C : STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES PARAMETRES D'ENTREE POUR LES 12 CLASSES TEXTURALES (CARSEL & PARRISH, 1988)	33
ANNEXES D : ÉTAPE 1 : SCRIPT GENERATION DES JEUX DE PARAMETRES	34
ANNEXES E : SCRIPT POUR LE CALCUL DE L'INDICE HSIC-GAMMA ET COEFFICIENT DE CORRELATION	35

Annexe A : Typologie des sols minéraux en zone humide (Barnaud & Fustec, 2007)

Un sol est considéré comme minéral lorsqu'il contient au maximum 30% de matière organique. Son engorgement quasi-permanent par l'eau permet la formation de différents types de sol, parmi lesquels les plus courants sont énumérés ci-dessous.

Les Fluviosols

Les Fluviosols se forment le long des cours d'eau avec des sédiments déposés dans les vallées. Leur composition granulométrique varie selon la position par rapport au cours d'eau. Les matériaux grossiers sont en amont, les plus fins sont transportés en aval. Ces sols ont une nappe phréatique peu profonde appelée "nappe alluviale". Leur jeunesse et évolution résultent des inondations récurrentes.

Les reductisols et les redoxisols

Ces sols évolués se trouvent dans les vallées, les plaines et les zones côtières, et se distinguent par leur saturation permanente ou temporaire en eau. Les sols bien drainés sont riches en oxygène, formant de l'oxyde de fer visible sous forme de bande rouille. Les sols saturés en eau sont en état d'anaérobie, réduisant le fer ferrique en fer ferreux et formant une couche de couleur bleu-vert.

a. Les reductisols

Apparaissent dans les milieux humides engorgés de façon permanente ou quasi-permanente par l'eau. Ils sont généralement présents dans les 50 premiers centimètres du sol, reflétant ainsi l'historique ou l'état actuel de saturation en eau. Ces sols peuvent être facilement identifiés à l'œil nu grâce à la couleur grisâtre de l'horizon, autrefois appelé « gley », qui indique la présence de fer réduit.

b. Les redoxisols

Les redoxisols se forment avec les fluctuations de la nappe phréatique, entraînant une saturation temporaire du sol selon le climat régional. Cette saturation favorise l'aération du sol, formant de l'oxyde de fer. Les taches rouille dans l'horizon, appelé "pseudo-gley", indiquent la présence de fer oxydé.

Les planosols

Le planosol se trouve dans les régions de faible relief. Sa caractéristique principale est un horizon argileux qui provoque une saturation prolongée. L'assèchement survient en été et son impact dépend de la structure du sol, notamment en présence de matériaux sableux très perméables.

Les luvisols hydromorphes

Le sol de type plateau se trouve couramment sur les plateaux et se distingue par la présence d'une couche imperméable d'argile en profondeur. Cette caractéristique favorise le drainage vertical de l'eau, entraînant ainsi l'argile vers les profondeurs. Lorsque le système de drainage est efficace, ce sol offre une fertilité agricole considérable.

Les thalassosols

Les sols des plaines littorales se caractérisent par leur proximité avec l'eau salée, ce qui entraîne la formation d'une texture fine composée de sable et de limon. Ces sols sont sujets à l'engorgement en raison de la remontée de la nappe phréatique ou de l'intrusion marine. Le drainage est souvent nécessaire pour des raisons d'exploitation agricole, afin d'évacuer l'excès d'eau.

Annexes A : Typologie des sols minéraux en zone humide (Barnaud & Fustec, 2007)

Annexe B : Densités de probabilité des paramètres d'entrée

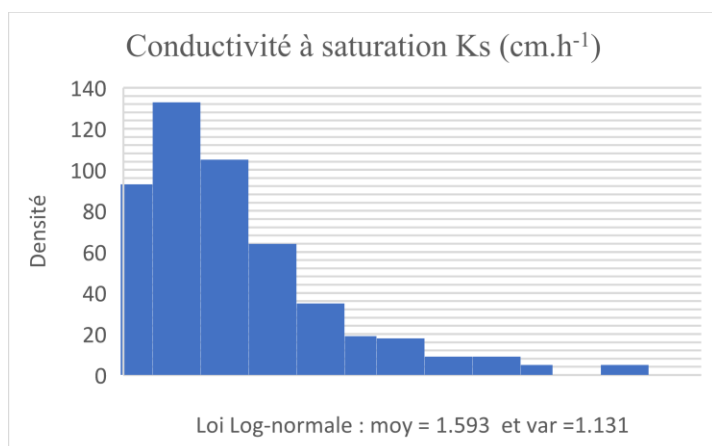


Figure 19 : Densité des fonctions de probabilité de conductivités à saturation K_s .

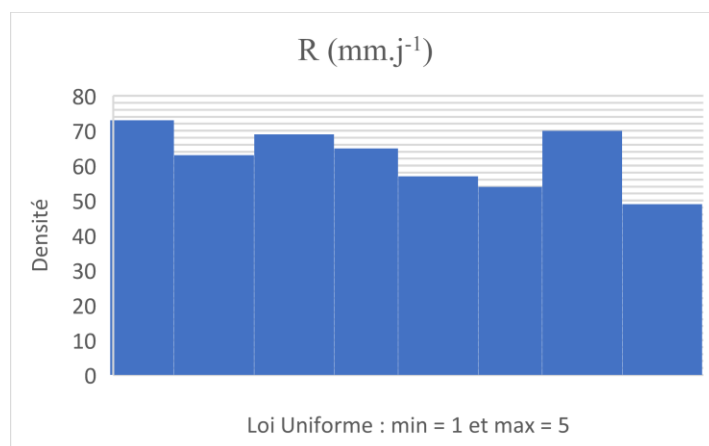


Figure 20 : Densité des fonctions de probabilité de la Recharge R .

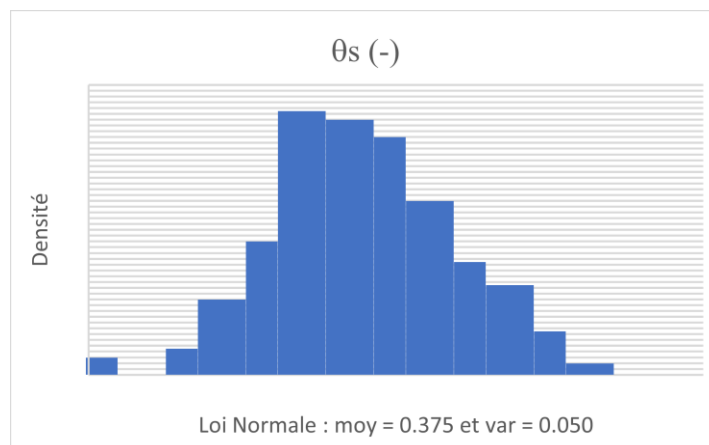
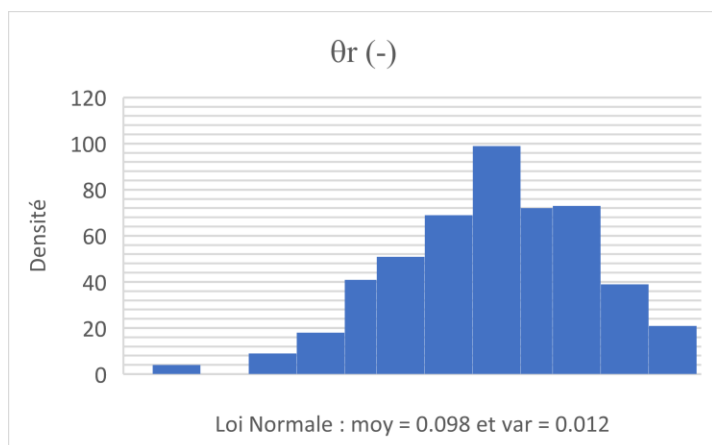


Figure 21: Densité des fonctions de probabilité de (a) la teneur en eau résiduelle θ_r , (b) teneur en eau à saturation θ_s

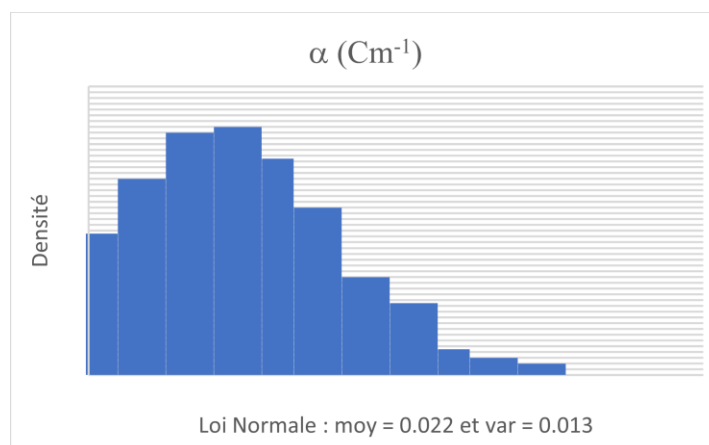
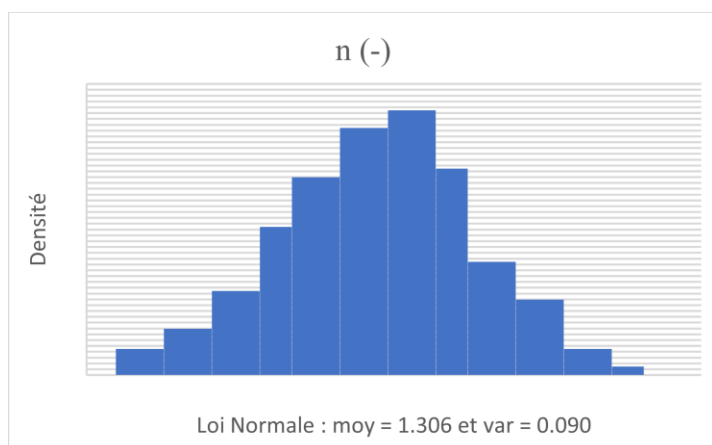


Figure 22: Densité des fonctions de probabilité des paramètres de van Genuchten n et α

Annexe C : Statistique descriptive des paramètres d'entrée pour les 12 classes texturales (Carsel & Parrish, 1988)

Tableau 5 : Descriptive Statistics for Saturated Water Content θ_s and Residual Water Content θ_r

soil type	Saturated Water Content θ_s		Residual Water Content θ_r	
	x	s	x	s
Clay	0.38	0.09	0.068	0.034
Clay loam	0.41	0.09	0.095	0.010
Loam	0.43	0.10	0.078	0.013
Loamy Clay	0.41	0.09	0.057	0.015
Silt	0.46	0.11	0.034	0.010
Silt loam	0.45	0.08	0.067	0.015
Silty clay	0.36	0.07	0.070	0.023
Silty clay Loam	0.43	0.07	0.089	0.009
Sand	0.43	0.06	0.045	0.010
Sandy clay	0.38	0.05	0.100	0.013
sandy clay loam	0.39	0.07	0.100	0.006
sandy loam	0.41	0.09	0.065	0.017

Tableau 6 : Descriptive Statistics for Hydraulic conductivity K_s and van Genuchten Water Retention Parameter α and n

soil type	Hydraulic Conductivity K_s (Cm.hr ⁻¹)		Water Retention Parameter α (cm ⁻¹)		Water Retention Model Parameter n (-)	
	x	s	x	s	x	s
Clay	0.20	0.42	0.008	0.012	1.09	0.09
Clay loam	0.26	0.70	0.019	0.015	1.31	0.09
Loam	1.04	1.82	0.036	0.021	1.56	0.11
Loamy Clay	14.59	11.36	0.124	0.043	2.28	0.27
Silt	0.25	0.33	0.016	0.007	1.37	0.05
Silt loam	0.45	1.23	0.020	0.012	1.41	0.12
Silty clay	0.02	0.11	0.005	0.005	1.09	0.06
Silty clay Loam	0.07	0.19	0.010	0.006	1.23	0.06
Sand	29.70	15.60	0.145	0.029	2.68	0.29
Sandy clay	0.12	0.28	0.027	0.017	1.23	0.10
sandy clay loam	1.31	2.74	0.059	0.038	1.48	0.13
sandy loam	4.42	5.63	0.075	0.037	1.89	0.17

Annexe D : Etape 1 : Script Génération des jeux de paramètres

Cette partie du script 1 permet tout d'abord d'installer les paquets nécessaires pour le projet, de définir le répertoire de travail pour les données d'entrée et les résultats de sortie. Ensuite, elle définit les fonctions de distribution normale et log-normale. À partir des données du **Tableau 2**, le script crée les matrices A et B, puis utilise la fonction Sobolmartinez du paquet "sensitivity" pour créer une matrice C à partir des deux matrices précédentes. Enfin, la matrice C est stockée dans différents formats (txt, xlsx et csv) pour conserver les jeux des paramètres.

```

1 #-----
2 #creation des matrices des données A, B, C
3 #-----
4 rm(list = ls()) # Remove global environment
5 PACKAGES <- c("hydroGOF","zoo","manipulate","graphics","reshape","xlsx","sensitivity","lubridate","dismo",
6 "foreach","doSNOW","progress","sp","akima","openxlsx")
7 if(length(PACKAGES) != 0){
8   isIn = PACKAGES %in% .packages(all = T) # Test si packages déjà chargés, renvoie vecteur de booléens
9   if(!all(isIn)){install.packages(PACKAGES[!isIn])} # Si pas chargé, on charge
10  lapply(PACKAGES, library, character.only = T)
11 }
12 WKspace <- "D:/Anas_HADRI/ZH/ZH"
13 WKspace_DATA <- paste0(WKspace,"")
14 WKspace_CODES <- paste0(WKspace,"")
15 WKspace_OUT <- paste0(WKspace,"/OUTPUTS/")
16 if(!dir.exists(paste0(WKspace_OUT)){dir.create(paste0(WKspace_OUT))}
17 WKspace_OUT <- paste0(WKspace_OUT,"SENSIBILITE")
18 if(!dir.exists(paste0(WKspace_OUT)){dir.create(paste0(WKspace_OUT))}
19 #-----
20 # Function for bounded norm and log-norm distribution
21 rtruncnorm <- function(N, mean = 0, sd = 1, a = -Inf, b = Inf) {
22   if (a > b) stop('Error: Truncation range is empty');
23   U <- runif(N, pnorm(a, mean, sd), pnorm(b, mean, sd));
24   return(qnorm(U, mean, sd)) }
25
26 rtruncnorm <- function(N, meanlog = 0, sdlog = 1, a = -Inf, b = Inf) {
27   if (a > b) stop('Error: Truncation range is empty');
28   U <- runif(N, plnorm(a, meanlog, sdlog), plnorm(b, meanlog, sdlog));
29   return(qlnorm(U, meanlog, sdlog)) }
30 #-----Détermination des moyennes, écarts types des distribution des paramètres par type de sol
31 STATS_X <- data.frame(read.table(file = paste0(WKspace_DATA,"/DATA_TEST/Data.csv"), sep = ",", header = TRUE))
32 # Creation of the sample matrix
33 n <- 100
34 Nbre_params <- 6
35 N_SIMU <- (Nbre_params + 2)*n # marche si ordre 2
36 PARAMS <- c("thr","ths","alfa","n","Ks","R")
37 # Définition des matrices A et B
38 # Matrice A
39 MAT_A <- data.frame(matrix(-9999, nrow = n, ncol = Nbre_params)); colnames(MAT_A) <- PARAMS
40 MAT_A$thr <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$thr[1], sd = STATS_X$thr[2], a = STATS_X$thr[3], b = STATS_X$thr[4])
41 MAT_A$ths <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$ths[1], sd = STATS_X$ths[2], a = STATS_X$ths[3], b = STATS_X$ths[4])
42 MAT_A$alfa <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$alfa[1], sd = STATS_X$alfa[2], a = STATS_X$alfa[3], b = STATS_X$alfa[4])
43 MAT_A$n <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$n[1], sd = STATS_X$n[2], a = STATS_X$n[3], b = STATS_X$n[4])
44 MAT_A$Ks <- rtruncnorm(N = n, meanlog = STATS_X$Ks[1], sdlog = STATS_X$Ks[2], a = STATS_X$Ks[3], b = STATS_X$Ks[4])
45 MAT_A$R <- runif(n, min = STATS_X$R[1], max = STATS_X$R[2])
46 # Matrice B
47 MAT_B <- data.frame(matrix(-9999, nrow = n, ncol = Nbre_params)); colnames(MAT_B) <- PARAMS
48 MAT_B$thr <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$thr[1], sd = STATS_X$thr[2], a = STATS_X$thr[3], b = STATS_X$thr[4])
49 MAT_B$ths <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$ths[1], sd = STATS_X$ths[2], a = STATS_X$ths[3], b = STATS_X$ths[4])
50 MAT_B$alfa <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$alfa[1], sd = STATS_X$alfa[2], a = STATS_X$alfa[3], b = STATS_X$alfa[4])
51 MAT_B$n <- rtruncnorm(N = n, mean = STATS_X$n[1], sd = STATS_X$n[2], a = STATS_X$n[3], b = STATS_X$n[4])
52 MAT_B$Ks <- rtruncnorm(N = n, meanlog = STATS_X$Ks[1], sdlog = STATS_X$Ks[2], a = STATS_X$Ks[3], b = STATS_X$Ks[4])
53 MAT_B$R <- runif(n, min = STATS_X$R[1], max = STATS_X$R[2])
54 # Extraction de la matrice C (A + B + permutations entre A et B)
55 sobolTEST <- sensitivity::sobolmartinez(model = NULL, MAT_A, MAT_B, nboot = 100, conf = 0.95)
56 MAT_C <- sobolTEST$X
57
58 #Sauvgarder Ks, teta s, teta r, alpha et n dans un fichier sol
59 write.table(MAT_C[,6], file = paste0(WKspace,"/sol.txt"), col.names = TRUE, row.names = TRUE, sep = ';')
60 write.csv(MAT_C[,6], file = paste0(WKspace,"/sol.csv"), sep = ";")
61
62 #Sauvgarder le recharge R dans un fichier pluvio
63 write.table(t(MAT_C[,6]), file = paste0(WKspace,"/pluvio.txt"), col.names = TRUE, row.names = TRUE, sep = ';')
64 write.csv(t(MAT_C[,6]), file = paste0(WKspace,"/pluvio.csv"), sep = ";")
65
66 #jeux de paramètres dans un fichier excel
67 write.xlsx(MAT_C, file = paste0(WKspace,"/OUTPUTS/data.xlsx"), col.names = TRUE, row.names = TRUE, overwrite = TRUE)
68

```

Figure 23 : Script Génération des jeux de paramètres

Annexe E : Script pour le calcul de l'indice HSIC-gamma et coefficient de corrélation

```

1  ## -----
2  library(energy)
3  library(kpcalg)
4  set.seed(10)
5  file="C:/Users/Public/ZHH/OUTPUTS/resultats_final.CSV"
6  donnees= read.csv(file = file,sep = ',')
7  donnees=donnees[, -1]
8  donnees=donnees[, -6]
9
10 colonne=c("thr","ths","alfa","n","ks","R")
11 ligne=c("D0.05","D0.1")
12
13 resulta_cov = matrix(0,nrow = 2, ncol = 6)
14 colnames(resulta_cov)=colonne
15 rownames(resulta_cov)=ligne
16
17 resulta_ind = matrix(0,nrow = 2, ncol = 6)
18 colnames(resulta_ind)=colonne
19 rownames(resulta_ind)=ligne
20
21
22 for (i in 1:length(ligne)) {
23   for (j in 1:length(colonne)) {
24     x <- donnees[[colonne[j]]]
25     y <- donnees[[ligne[i]]]
26     cor_value <- cor(x, y)
27     p_value <- dcov.test(x, y, R = 100)$p.value
28     resulta_cov[i, j] <- cor_value
29     resulta_ind[i, j] <- p_value
30   }
31 }
32
33 write.xlsx(resulta_cov,file = "C:/Users/Public/ZHH/OUTPUTS/resulta_cov.xlsx ")
34 write.xlsx(resulta_ind,file = "C:/Users/Public/ZHH/OUTPUTS/resulta_ind.xlsx ")
35 write.csv(resulta_cov,file = "C:/Users/Public/ZHH/OUTPUTS/resulta_cov.csv ",sep = ";")
36 write.csv(resulta_ind,file = "C:/Users/Public/ZHH/OUTPUTS/resulta_ind.csv ",sep = ";")
37
38 ## ----message=F-----
39
40 ## ----message=F-----
41 library(pcalg)
42 library(kpcalg)
43 #dependent
44 test1b <- kernelCIttest(x=1,y=2,S=c(4),suffStat = list(data=donnees,ic.method="dcc.gamma"))
45 test2b <- kernelCIttest(x=1,y=2,S=c(4),suffStat = list(data=donnees,ic.method="dcc.perm"))
46 test3b <- kernelCIttest(x=1,y=2,S=c(4),suffStat = list(data=donnees,ic.method="hsic.gamma"))
47 test4b <- kernelCIttest(x=1,y=2,S=c(4),suffStat = list(data=donnees,ic.method="hsic.perm"))
48 test5b <- kernelCIttest(x=1,y=2,S=c(4),suffStat = list(data=donnees,ic.method="hsic.clust"))
49 test6b <- gaussCIttest( x=1,y=2,S=c(4),suffStat = list(C=cor(donnees),n=8))
50
51 cat("DCC (gamma test): \t\t\t",test1b,
52     "\nDCC (permutation test): \t\t",test2b,
53     "\nHSIC-residuals (gamma test): \t\t",test3b,
54     "\nHSIC-residuals (permutation test): \t",test4b,
55     "\nHSIC-cluster: \t\t\t\t",test5b,
56     "\nFisher's Z test: \t\t\t",test6b)

```

Figure 24 : Script pour le calcul de l'indice HSIC-gamma et coefficient de corrélation

Liste des figures

FIGURE 1: ORGANIGRAMME DU CENTRE ILE-DE-FRANCE - JOUY-EN-JOSAS - ANTONY (INRAE).....	6
FIGURE 2: SCHEMA D'UNE ZONE HUMIDE (ZONES-HUMIDES.ORG)	8
FIGURE 3 : SERVICES RENDUS PAR LES ZH (ECOLOGIE.GOUV.FR).....	11
FIGURE 4 : CRITERES DE DEFINITION ET DE DELIMITATION D'UNE ZONE HUMIDE (ECOLOGIE.GOUV.FR).....	11
FIGURE 5: TYPOLOGIE DES ZONES HUMIDES (ECOLOGIE.GOUV.FR).....	13
FIGURE 6 : STRUCTURE DE L'ETUDE ET DEMARCHE A SUIVRE	14
FIGURE 7: SCHEMATISATION DU PROCESSUS DE MODELISATION DES ECOULEMENT SOUTERRAINS (MANUEL HYDRUS).....	15
FIGURE 8 : DEMARCHE DE SIMULATION (REUNION INRAE-OFB, LE 23/01/2023).....	16
FIGURE 9 : L'ALGORITHME POUR LA CREATION DES JEUX DE PARAMETRES (ETAPE 1).....	20
FIGURE 10 : ALGORITHME DE SIMULATION AVEC LE SCRIPT HYDRUS (ETAPE 2).....	21
FIGURE 11 :ALGORITHME POUR CALCUL DE LA DISTANCE D'INFLUENCE (ETAPE 3)	22
FIGURE 12 : EXEMPLE DES ABAQUES*	23
FIGURE 13 : ALGORITHME POUR REALISER TEST DE SENSIBILITE (ETAPE 4)	24
FIGURE 14 : VARIATION DE DISTANCE LATERALE EN FONCTION DE R ET N.....	24
FIGURE 15 : VARIATION DE DISTANCE LATERALE EN FONCTION DE θ_R ET θ_S	24
FIGURE 16 : VARIATION DE DISTANCE LATERALE EN FONCTION DE K_S ET α	25
FIGURE 17 : HAUTEUR DE LA NAPPE EN FONCTION DE LA DISTANCE PAR RAPPORT AU SYSTEME DE DRAINAGE POUR DIFFERENTES VALEURS DE K_S	25
FIGURE 18 : HSIC-RESIDUELS (TEST GAMMA)	26
FIGURE 19 : DENSITE DES FONCTIONS DE PROBABILITE DE CONDUCTIVITES A SATURATION K_S	32
FIGURE 20 : DENSITE DES FONCTIONS DE PROBABILITE DE LA RECHARGE R.	32
FIGURE 21: DENSITE DES FONCTIONS DE PROBABILITE DE (A) LA TENEUR EN EAU RESIDUELLE θ_R , (B) TENEUR EN EAU A SATURATION θ_S	32
FIGURE 22: DENSITE DES FONCTIONS DE PROBABILITE DES PARAMETRES DE VAN GENUCHTEN N ET α	32
FIGURE 23 : SCRIPT GENERATION DES JEUX DE PARAMETRES.....	34
FIGURE 24 : SCRIPT POUR LE CALCUL DE L'INDICE HSIC-GAMMA ET COEFFICIENT DE CORRELATION	35

Liste des tableaux

TABLEAU 1: APPORTS MAJEURS D'EAU ET CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DOMINANTES DES CLASSES HYDROGEOMORPHOLOGIQUES MODIFIE D'APRES (AMMANN, SMITH, 1995).....	9
TABLEAU 2 : DENSITES DE PROBABILITE DES PARAMETRES SELECTIONNES POUR SOL LIMONO-ARGILEUX. LES FONCTIONS SONT DECRITES PAR LEUR MOYENNE μ ET LEUR VARIANCE σ POUR LES LOIS LN (LOG-NORMALE) ET N (NORMALE), ET PAR LE MINIMUM ET LE MAXIMUM POUR LA LOI U (UNIFORME)	19
TABLEAU 3 : EXEMPLE DES RESULTATS DE CALCUL DE LA DISTANCE LATERALE D'INFLUENCE	22
TABLEAU 4 : L'INDICE DE CORRELATION ENTRE CHAQUE PAIRE DE PARAMETRES D'ENTREE ET LA DISTANCE D'INFLUENCE	26
TABLEAU 5 : DESCRIPTIVE STATISTICS FOR SATURATED WATER CONTENT θ_S AND RESIDUAL WATER CONTENT θ_R	33
TABLEAU 6 : DESCRIPTIVE STATISTICS FOR HYDRAULIC CONDUCTIVITY K_S AND VAN GENUCHTEN WATER RETENTION PARAMETER α AND N.....	33

Table des matières

RESUME.....	3
ABSTRACT.....	3
SOMMAIRE.....	4
GLOSSAIRE.....	5
SIGLES ET ACRONYMES.....	5
DESCRIPTION D'ORGANISME D'ACCUEIL	6
INTRODUCTION	7
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	8
GENERALITES SUR LES ZONES HUMIDES ET LEUR FONCTIONNEMENT	11
<i>Typologie du sol en zone humide (Zanella et al., 2011)</i>	11
<i>Fonctionnement hydrologique des zones humides</i>	12
<i>Méthode d'estimation de la hauteur de nappe en zone humides</i>	12
DRAINAGE	12
<i>Définition en rapport avec le drainage</i>	12
<i>Les pratique de drainage en zone humide</i>	13
TYPOLOGIE DES ZONES HUMIDES	13
OUTILS ET METHODE	14
APPROCHE	14
PRESENTATION DU LOGICIEL DE SIMULATION HYDRUS-2D	15
LANGAGE DE PROGRAMMATION R	16
TEST DE SENSIBILITE	17
<i>Test de Sobol</i>	17
<i>Test HSIC</i>	17
DONNEES DISPONIBLES	18
RESULTATS ET DISCUSSION.....	20
ETAPE 1 : GENERATION DES JEUX DE PARAMETRES	20
ETAPE 2 : SIMULATION AVEC SCRIPT HYDRUS.....	21
ETAPE 3 : DISTANCE D'INFLUENCE	22
ETAPE 4 : TEST DE SENSIBILITE DES DIFFERENTS PARAMETRES	23
CONCLUSION	27
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	28
ANNEXES	30
ANNEXE A : TYPOLOGIE DES SOLS MINERAUX EN ZONE HUMIDE (BARNAUD & FUSTEC, 2007).....	31
ANNEXE B : DENSITES DE PROBABILITE DES PARAMETRES D'ENTREE	32
ANNEXE C : STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES PARAMETRES D'ENTREE POUR LES 12 CLASSES TEXTURALES (CARSEL & PARRISH, 1988)	33
ANNEXE D : ETAPE 1 : SCRIPT GENERATION DES JEUX DE PARAMETRES	34
ANNEXE E : SCRIPT POUR LE CALCUL DE L'INDICE HSIC-GAMMA ET COEFFICIENT DE CORRELATION	35
LISTE DES FIGURES.....	36
LISTE DES TABLEAUX.....	36
TABLE DES MATIERES	37

Résumé

En France, tout aménagement dont la surface d'impact sur une zone humide dépasse le seuil autorisé par la loi donne lieu à une déclaration ou à une autorisation. Cette dernière doit être faite par l'aménageur. Cette étude vise à déterminer la surface de la zone humide impactée par l'aménagement en utilisant une approche numérique. On a utilisé le logiciel HYDRUS 2D pour modéliser les écoulements saturés/non saturés 2D basée sur l'équation de Richards. L'objectif de ce stage consiste, dans un premier temps, à calculer la distance latérale d'impact pour différentes typologies de zones humides et d'aménagements (drain enterré ou fossé). Dans un deuxième temps, l'objectif est de réaliser une analyse de sensibilité pour identifier les paramètres les plus influents dans le calcul de la surface impactée par un ouvrage de drainage, cela permettra de définir le niveau de précision requis pour chaque paramètre afin d'obtenir une incertitude acceptable sur la surface impactée, rendant ainsi l'outil opérationnel. Ceci permettra à la fin de décider si l'aménageur est dans une situation régulière ou s'il doit procéder à une déclaration ou à une autorisation avant tout aménagement effectué dans une zone humide.

Mots clés

Drainage agricole , Zone humide, modélisation hydrodynamique, impact, drain, fossé , analyse de sensibilité.

Pour citer cet ouvrage : [HADRI, Anas,2023. Développement d'un outil d'évaluation de la surface impactée par le drainage agricole pour la protection des zones humides. Mémoire de stage M1, Master Eau, spécialité Eau et Agriculture, AgroParisTech/Institut Agro Montpellier/Univ. Montpellier. Nombre de pages.]

648 Rue Jean François Breton, 34090 Montpellier