



HAL
open science

Prévoir les jours disponibles pour réussir les opérations culturales et éviter les tassements des sols en grandes cultures

Fritzner Pierre-Louis

► **To cite this version:**

Fritzner Pierre-Louis. Prévoir les jours disponibles pour réussir les opérations culturales et éviter les tassements des sols en grandes cultures. Science des sols. 2021. hal-03483189

HAL Id: hal-03483189

<https://hal.inrae.fr/hal-03483189>

Submitted on 16 Dec 2021

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.

Prévoir les jours disponibles pour réussir les opérations culturales et éviter les tassements des sols en grandes cultures



Présenté par :

Fritzner Pierre-Louis

Étudiant en Master 2 GPDS, Faculté Jean Monnet, Université Paris Saclay

Sous la direction de :

Prof. Agnès Ricroch

Enseignant-Chercheur au Laboratoire Écologie Systématique Évolution (ESE)

UFR Sciences, UFR Droit-Économie-Gestion

Année universitaire 2020-2021

Prévoir les jours disponibles pour réussir les opérations culturales et éviter les tassements des sols en grandes cultures

Mémoire de Master 2 Gouvernance de projets de développement durable au Sud

Présenté par : **Fritzner Pierre-Louis**

Sous la direction de : **Prof. Agnès Ricroch**

Tuteurs de stage au centre INRAE Val de Loire, UR 0272 SOLS :

Marine Lacoste, Chargée de Recherche

Hocine Bourenane, Ingénieur d'études



Remerciement

Mes remerciements vont en premier lieu à mes tuteurs de stage Marine Lacoste et Hocine Bourennane. Je les remercie sincèrement pour l'opportunité qu'ils m'ont offerte en m'accueillant comme stagiaire au sein de l'Unité de Recherche Sols de L'INRAE, leur encadrement et leur disponibilité tout au long du stage et surtout lors de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie les partenaires du projet J-Distas pour leur aide et leur accompagnement, en particulier Pascale Métails (Arvalis), Pierre Descazeaux (Arvalis), Guillaume Brisset (ITB) et Nicolas Rogier (Arvalis). Je remercie également tous les membres du comité de suivi du stage : Benoit Piquemal (Arvalis) pour son accompagnement dans l'analyse de sensibilité, Annie Duparque (Agro-Transfert), Damian Martin (Agro-Transfert), Phillippe Billa (Chambre d'Agriculture de l'Oise).

Mes remerciements vont également à Madame Agnès Ricroch, ma directrice de mémoire, pour ses conseils et son encadrement et à Madame Delphine Placidi-Frot, mon enseignante référente, pour ses conseils et son support.

L'expression de ma gratitude va à ma fiancée Berlie JOSEPH, qui m'a été d'un grand soutien dans la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de répondre à mes questions durant mes recherches.

Un grand merci à tous ceux et celles qui, d'une façon ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail.

A ma mère qui a sacrifié son bonheur au profit du mien, je dédie ce travail.

RÉSUMÉ

Le tassement des sols est l'une des principales sources de dégradation des sols en Europe. Il est généralement dû à la mécanisation des activités agricoles qui se traduit par des passages des machines agricoles de plus en plus lourdes dans les champs, dans des conditions climatiques défavorables, lors de la réalisation des opérations culturales. Pour préserver les sols contre ce risque de dégradation, il existe des mesures préventives par la détermination de « jours disponibles » ou favorables à l'aide des outils de simulation, prenant en compte les conditions de réussite des pratiques agricoles et la préservation des sols vis-à-vis du tassement. Jusqu'à date, les outils qui existent permettent de les simuler séparément et ne permettent pas de les prédire simultanément. A cet effet, l'outil J-Distas propose de les combiner afin d'aider les agriculteurs à faire des choix stratégiques. Le but de notre étude est de calculer des jours disponibles pour une opération culturale donnée dans 3 types de sols différents sur des données climatiques historiques et d'évaluer l'impact des variables d'entrées sur le nombre de jours disponibles par la méthode d'analyse de sensibilité de Morris. Les résultats montrent que pour un même type de sol, les environnements (scenarii de simulations avec une faible variation des propriétés du sol) n'ont aucun impact sur le nombre de jours disponibles. Cependant, des impacts du climat (variations inter-annuelles) et du type de sol (variations entre les différents types de sols) sont pour autant observés. L'analyse de sensibilité révèle des interactions significatives entre les variables d'entrée considérées en absence d'effet spécifique d'une variable prise individuellement. Ainsi, la pression de gonflage des roues avant, le poids de la machine et la répartition du poids de la machine sur les roues, en interaction entre eux ou avec d'autres variables d'entrée, conditionnent le nombre de jours disponibles pour l'opération culturale considérée. Les valeurs de ces variables doivent être renseignées avec plus de précaution lors de l'utilisation de l'outil.

Mot clés : jours disponibles, tassement des sols, modèle de culture, modèle de tassement, règles de décision, analyse de sensibilité, indices de Morris

ABSTRACT

Soil compaction is one of the main soil degradation sources in Europe. It is generally caused by the mechanization of agricultural activities which results in the passage of increasingly heavy agricultural machinery in the fields, in unfavourable climatic conditions, during the realization of the agricultural operations. To preserve soils against this risk of degradation, there are also preventive measures by determining "agronomic available days" or agronomic favorable days with simulation tools, considering the conditions of success of agricultural practices and the preservation of soils against compaction. Until now, the tools that exist have allowed to simulate them separately and do not allow to predict them simultaneously. For this reason, the J-Distas tool proposes to combine them in order to help farmers make strategic choices. The aim of our study is to calculate agronomic available days for a specific cropping operation in 3 different types of soils based on historical climate data and to evaluate the impact of the input variables on the number of agronomic available days by using the Morris sensitivity analysis method. The results indicate that the environments (simulation scenarios with a small variation in soil properties) have no impact on the agronomic available days for the same soil type. However, impacts of climate (inter-annual variations) and soil type (variations between different soil types) are observed. The sensitivity analysis reveals significant interactions between the input variables considered with no specific effect of an individual variable. Thus, the inflation pressure of the front wheels, the weight of the machine and the weight distribution of the machine on the wheels, interacting with each other or with other input variables, that affect the agronomic available days for the agricultural operation studied. The values of these variables must be reported with more precaution when using the tool.

Key words: available days, soils compaction, crop model, compaction model, decision rules, sensitivity analysis, sensitivity index Morris

Table des matières

RÉSUMÉ.....	i
INTRODUCTION.....	1
I. Présentation de la problématique de tassement de sol	6
I.1. Tassement de sols	6
I.1.1. Définition et enjeux	6
I.1.2. Catégorie de tassement	11
I.1.3. Le tassement des sols : un processus complexe aux multiples impacts	11
I.2. Etat des lieux des problèmes de tassement	13
I.2.1. Evolution du poids des machines et impact sur le tassement.....	15
I.2.2. Le risque de tassement de sol en France	19
I.3. Prévention des tassements	22
I.3.1. Nécessité de mettre en place des mesures de prévention des tassements des sols ..	22
I.3.2. Les différents types de prévention.....	23
II. Le concept de « Jours Disponibles » et les modèles disponibles.....	26
II.1. Présentation de la notion de jour disponible	26
II.1.1. Définitions	26
II.1.2. Pourquoi calculer les jours disponibles ?	27
II.2. Méthodes d'évaluation des jours disponibles, outils et modèles existants	28
II.2.1. Type de modèles permettant d'estimer les jours disponibles.....	28
II.2.2. Modèles et/ou outils existants	29
III. Analyse de sensibilité.....	45
III.1. Généralités et principes de base de l'analyse de sensibilité	45
III.2. Sources d'incertitude dans un modèle	47
III.3. Déroulement d'une analyse de sensibilité	48
III.4. Classification des méthodes de sensibilité.....	50
III.4.1. Méthodes d'analyse de sensibilités locales	50
III.4.2. Méthodes d'analyse de sensibilité globales	51
III.5. Critères de choix d'une méthode d'analyse de sensibilité	56
IV. Matériels et Méthodes	60
IV.1. Contexte de l'analyse de sensibilité	60
IV.1.1. Sources des données utilisées	60
IV.1.2. Opération culturale traitée dans l'étude	60
IV.1.3. Machine agricole choisie	61
IV.1.4. Données sur le sol.....	61
IV.2. Réalisation de l'analyse de sensibilité et plan de simulation utilisé dans cette étude .	63

IV.2.1. Choix des environnements de l'étude	63
IV.2.2. Variables étudiées dans l'analyse de sensibilité de Morris et hypothèse utilisée pour faire varier les variables	66
IV.2.3. Définition du plan d'expérience de Morris	67
IV.2.4. Calcul du nombre de jours disponible pour la destruction de couvert et plan de simulation de l'analyse de sensibilité	69
IV.3. Récapitulatif des outils utilisés	70
V. Résultats et discussion	72
V.1. Nombre de Jours Disponibles pour la destruction de couvert : impact de l'environnement	72
V.2. Choix du nombre de répétition : paramétrisation de l'analyse de sensibilité	77
V.3. Résultat de l'analyse de sensibilité de Morris de l'outil J-Distas : influence des variables d'entrée sur le nombre de jours disponibles	80
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	84
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	86
ANNEXES	I

Liste des figures

Figure 1 : Effet du tassement sur l'enracinement (source : INRAE). A gauche un sol tassé (les racines sont peu nombreuses) et à droite un sol non tassé (les racines sont bien développées et prospectent toute l'épaisseur du sol).	7
Figure 2 : Présentation d'un tassement superficiel après le passage d'une machine agricole (source : Dilepix).....	8
Figure 3 : Tassement d'un sol (source : INRAE).....	9
Figure 4 : Mauvaise infiltration de l'eau dans un sol tassé.	9
Figure 5 : susceptibilité naturelle des sols européens au tassement (European Commission, 2008).....	15
Figure 6 : Évolution historique a) des charges sur les roues avant des moissonneuses-batteuses (Schjønning et al., 2015) et b) des charges sur les roues arrière des tracteurs (la ligne en pointillée représente l'augmentation de 25 % de la charge de la roue arrière) (Brunotte et al., 2012).....	17
Figure 7 : Représentation de la pression exercée sur le sol un pneu étroit ou large en fonction de la charge (Métais, 2019).	18
Figure 8 : Effet du tassement du sol sur le rendement de plusieurs cultures (Labreuche et Métais, 2020). Essais réalisés Baziège (31) en sol argileux, à Boigneville (91) en limon argileux et la Jaillièrre (44) en limon drainé.	20
Figure 9 : Sensibilité au tassement des sols agricoles cultivés en blé en France (Lefebvre, 2010).	21
Figure 10 : Schéma présentant le fonctionnement du modèle J.Dispo (ARVALIS Institut du végétal, 1996).	29

Figure 11 : Les données d'entrées de Perfbet (ITB, 2014).	33
Figure 12 : Exemple de sortie de la répartition du nombre de jours disponibles pour réaliser une récolte (Perfbet).	34
Figure 13 : Données d'entrée et de sorties du logiciel Simeq (Retaureau et Noël, 2011).	36
Figure 14 : Les compartiments du modèle CHN et les flux (Laberdesque et al., 2017).	38
Figure 15 : Fonctionnement du modèle Terranimo®.	40
Figure 16 : Résultats de sortie de Terranimo®, comparant les contraintes des roues avec la résistance du sol.	40
Figure 17 : Fonctionnement schématique de l'outil J-Distas.	43
Figure 18 : Etape de validation d'un modèle (Toulet, 2012).	45
Figure 19 : Description du principe général de l'analyse de sensibilité.	46
Figure 20 : Sources d'incertitude dans un modèle.	48
Figure 21 : Analyse de sensibilité locale (Faivre et al., 2013).	50
Figure 22 : Analyse de sensibilité globale (Faivre et al., 2013).	51
Figure 23 : Interprétation des indices de Morris (Campolongo et al., 2007).	55
Figure 24 : Grille de sélection d'une méthode d'analyse de sensibilité (Faivre et al., 2013). ..	58
Figure 25 : Nombre de jours disponibles pour le sol situé en Île-de-France sur la période de 2003 à 2021. Les symboles sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres pour que les points se superposant soient visibles.	74
Figure 26 : Nombre de jours disponibles pour le sol situé en Picardie sur la période de 2003 à 2021. Les symboles sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres pour que les points se superposant soient visibles.	74
Figure 27 : Nombre de Jours Disponibles pour le sol situé en Centre-Val de Loire sur la période de 2003 à 2021. Les symboles sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres pour que les points se superposant soient visibles.	75
Figure 28 : Variation des écarts types de μ^* en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Île-de-France.	77
Figure 29 : Variation des écarts types de σ en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Île-de-France.	78
Figure 30 : Variation des écarts types de μ^* en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Picardie.	78
Figure 31 : Variation des écarts types de σ en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Picardie.	78
Figure 32 : Variation des écarts types de μ^* en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Centre-Val de Loire.	78
Figure 33 : Variation des écarts types de σ en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Centre-Val de Loire.	79
Figure 34 : Influence des variables d'entrée sur le nombre de Jours Disponibles en Île-de-France avec 100 répétitions. Les barres représentent l'étendu des valeurs minimale et maximale de μ^* et de σ sur les saisons 2019-2021 autour de la moyenne (point central).	81
Figure 35 : Influence des variables d'entrée sur le nombre de Jours Disponibles en Picardie avec 100 répétitions. Les barres représentent l'étendu des valeurs minimale et maximale de μ^* et de σ sur les saisons 2019-2021 autour de la moyenne (point central).	82

Figure 36 : Influence des variables d'entrée sur le nombre de Jours Disponibles en Centre-Val de Loire avec 100 répétitions. Les barres représentent l'étendu des valeurs minimale et maximale de μ^* et de σ sur les saisons 2019-2021 autour de la moyenne (point central)..... 82

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classement des textures de sols selon leur sensibilité au tassement (Jamagne, 1967).	10
Tableau 2 : Risque de tassement en fonction du type de tracteur utilisé, du type de sol, de l'épaisseur de sol ressuyée.	22
Tableau 3 : Date conseillée de destruction des couverts, en fonction du sol et de la culture suivante (Brun et Labreuche, 2020).	61
Tableau 4 : Coefficient de percolation en fonction du type de sol (Base de données Arvalis)	62
Tableau 5 : Coefficient de percolation choisi par site de simulation.	63
Tableau 6 : Présentation des six environnements définis à partir du sol de Centre-Val de Loire.	64
Tableau 7 : Présentation des six environnements définis à partir du sol d'Île-de-France.....	65
Tableau 8 : Présentation des six environnements définis à partir du sol de Picardie.....	65
Tableau 9 : Variables étudiées dans l'analyse de sensibilité de Morris.	66
Tableau 10 : Gamme de variation du coefficient de percolation choisie.	66
Tableau 11 : Gamme de variation des variables des machines agricoles choisie.	67
Tableau 12 : Plan de simulation pour le choix de la valeur de R.	68
Tableau 13 : Plan de simulation pour l'analyse de sensibilité.	70
Tableau 14 : Récapitulatif des nombres de jours disponibles pour chacun des trois sols étudiés.	74

Liste des sigles et abréviations

CASDAR : Compte d'Affectation Spécial « Développement agricole et rural » (CASDAR)

CP : Coefficient de percolation

ECE : Environnement en Centre-Val de Loire

EIL : Environnement en Île-de-France

EPI : Environnement en Picardie

ETP : Evapotranspiration Potentielle

FAST : Fourier Amplitude Sensitivity Test

FNCUMA : Fédération Nationale des Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole

FNEDT : Fédération Nationale Entrepreneurs Des Territoires

HDMR : High Dimensional Model Representation

IB : Indice de Battance

ICTF : Institut Technique des Céréales et des Fourrages

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

ISRIC : International Soil Reference and Information Centre

ITB : Institut technique de la betterave

MASC: Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems

Mg : Méga gramme

MO : Matière organique

OAD : Outil d'aide à la décision

OAT: One-At-a-Time

RU: Réserve utile

UR : Unité de recherche

INTRODUCTION

Avec une croissance démographique élevée, qualifiée « d'explosion démographique » à partir de 1950, l'Homme s'est trouvé dans l'obligation d'accroître la production agricole pour continuer à répondre aux besoins de la population mondiale en termes d'alimentation. Depuis, cette population ne cesse d'augmenter, et elle passera d'environ 7,8 milliards de personnes aujourd'hui à 9,7 milliards de personnes en 2050 (FAO, 2020). Pour atteindre cet objectif de sécurité alimentaire, les producteurs agricoles ont instauré à partir des années 1960 une agriculture connue sous le nom d'agriculture « productiviste » ou « intensive » : c'est la révolution verte (FAO, 1996). L'intensification requiert une utilisation importante d'intrants et de la mécanisation, laquelle a largement remplacé l'utilisation des animaux et certains travaux manuels par l'utilisation de machines agricoles (Pascal, 1979 ; Tilmann, 1998).

Les machines agricoles ont effectivement la capacité d'augmenter la productivité, d'améliorer le calendrier des opérations culturales, de combler le manque de main-d'œuvre, de réduire la pénibilité des travaux agricoles en éliminant, par exemple, la charge des travaux manuels et dans certains cas, en facilitant une meilleure utilisation des ressources. Malgré tous ces avantages, ce mode de production n'est pas sans conséquences sur l'environnement. Il est indéniable que l'utilisation des machines agricoles a des impacts sur le réservoir des ressources naturelles et sur le fonctionnement des écosystèmes en général, ce qui peut mettre en péril la capacité productive de l'agriculture. La dégradation des sols, par l'érosion et le tassement, fait partie des effets les plus visibles. De nombreuses conséquences en découlent, comme la réduction des rendements et de la qualité des produits, liés à l'épuisement des ressources naturelles (Métais, 2019).

La question de la dégradation du sol est un enjeu majeur du développement durable. Il est donc impératif de penser à la qualité du sol qu'exploiteront les générations futures car, au-delà de tous les progrès technologiques, la majeure partie de la consommation humaine vient de l'agriculture. D'où la nécessité de se questionner sur les causes de la dégradation du sol.

La déforestation, l'agriculture intensive, la pollution industrielle, le surpâturage et l'érosion hydrique sont les principales causes de dégradations des sols recensées dans le monde entier. En Europe, le tassement des sols et l'érosion sont les causes majeures de dégradation physique de sols. Selon l'ISRIC¹, depuis 1991, près de 33 millions d'hectares de terres émergées étaient

¹ ISRIC : International Soil Reference and Information Centre

déjà concernés par ces dégradations, ce qui serait l'équivalent de 4% des terres (dont seulement 12% des dégradations dues à l'érosion hydrique) (Oldeman et al., 1991 ; Richard, 2008).

L'utilisation de machines agricoles de plus en plus lourdes contribue à augmenter la pression mécanique sur les sols, engendrant ainsi une augmentation du tassement des sols (Schjønning et al., 2015). En France, ce constat a été fait depuis les années 1990 en Haut de France par l'unité Agro-Impact de l'INRAE, et ce phénomène s'accroît de jour en jour (Christian, 2014). Des améliorations ont été apportées dans les pneumatiques pour limiter l'impact de ces machines agricoles sur les sols, mais cela a généré des chantiers plus lourds qui contribuent tout autant à augmenter les contraintes appliquées au sol (Keller et al., 2019).

Il est aujourd'hui reconnu que la fertilité physique des sols agricoles est menacée par ce phénomène de tassement, impactant aussi bien les horizons de surface que les horizons profonds. Ces tassements peuvent résulter de l'accroissement du poids des matériels agricoles mais aussi de la réalisation d'interventions culturales (récoltes, désherbage mécanique, travail du sol, etc.) en mauvaises conditions (Benamou, 2018). Le tassement du sol nuit à ses fonctions clés et aux services écosystémiques auxquels ils contribuent (Dominati et al., 2010). L'augmentation du risque de tassement coïncide avec une stagnation du rendement des cultures et augmente les risques d'inondation (Oldeman et al., 1991). Bien que le tassement des sols soit un problème bien connu, il demeure encore difficile de quantifier ses coûts économiques et écologiques (Richard, 2008).

Avec la généralisation de la mécanisation en grandes cultures, dans les vignobles et dans les forêts, le tassement concerne désormais l'ensemble des sols français. Une étude menée dans le cadre du projet Sol-D'Phy en Haut de France a montré qu'un tiers des parcelles observées présentait des tassements profonds. Les tassements s'expriment par des pertes de rendement variant de 10 à 30% selon l'espèce cultivée, en considérant des cultures printanières et estivales (Vincent, 2020).

Il est important de souligner que la fertilité physique des sols pourrait être affectée par des interventions culturales réalisées dans de mauvaises conditions. Certaines opérations culturales nécessitent, par exemple, des conditions d'humidité du sol adéquates afin de limiter les risques de tassement. De plus, la réduction de l'utilisation des intrants chimiques exige le développement de nouvelles pratiques agricoles, comme le désherbage mécanique, dans un calendrier cultural déjà très chargé. Cela a pour effet d'augmenter le nombre de passage de machines agricoles sur les sols, et donc le risque de tassement. De ce fait, pour maximiser

l'efficacité des opérations culturales, les interventions doivent être réalisées dans des conditions bien précises (Vincent, 2020).

Ainsi, l'évolution des chantiers d'implantation ou de récolte avec des matériels lourds mais efficaces, permettant de gagner en performance et en qualité de travail, répond au besoin de gain de temps de travail sur les exploitations. Cette évolution impose une prise en compte des risques de tassement, en particulier en profondeur, pouvant affecter durablement un sol, et jusqu'à présent peu considérés à la fois dans les outils et dans les décisions des agriculteurs. C'est pour cela qu'il est capital de déterminer les jours disponibles pour réaliser les opérations culturales dans de bonnes conditions (Vincent, 2020). Un jour est considéré comme disponible quand il est possible de réaliser les opérations culturales dans des conditions agronomiques satisfaisantes vis-à-vis de la qualité d'exécution de l'opération et sans que le passage des machines agricoles ne dégrade la structure du sol.

Un travail d'enquête réalisé en 2016 a mis en avant une forte demande des agriculteurs en outils de calcul des jours disponibles pour les aider dans le choix des matériels agricoles (lors d'investissements notamment), dans l'organisation des opérations culturales, ou dans l'accompagnement à l'évolution des pratiques et des systèmes agricoles (Ben Romdhane, 2016). Le problème est que les outils actuellement disponibles ne traitent chacun qu'une partie du problème : soit le risque de tassement profond, soit la possibilité de réaliser des opérations culturales efficaces, mais ne traitent pas simultanément les deux enjeux. De plus, ces outils ont été construits pour certains dans des contextes de sol, climat et/ou pratiques et matériels agricoles différents de ceux actuellement rencontrés en France. Les améliorer faciliterait leur utilisation et les rendre interopérables permettrait de répondre à la demande des conseillers agricoles.

C'est dans ce contexte que le projet J-Distas, porté par ARVALIS et regroupant de nombreux partenaires (UniLaSalle, Chambres d'Agriculture, ITB, AgroTransfert, INRAE, etc.) vise à développer un modèle qui permet de prévoir les jours disponibles pour réaliser les opérations culturales dans de bonnes conditions agronomiques et éviter les compactations ou tassements des sols dans les exploitations agricoles, à travers une plateforme d'outils portant le nom de « J-Distas ». Pour estimer les jours disponibles, l'outil J-Distas se base sur des indicateurs de traficabilité et de travaillabilité. La traficabilité est la capacité d'un sol à supporter le passage d'une machine agricole sans qu'il y ait de déformation importante et/ou irréversible pouvant affecter sa structure, c'est-à-dire sans risque de tassement. La travaillabilité est la possibilité de

réaliser une opération culturale dans de bonnes conditions d'efficacité, en limitant les dommages. L'outil se base sur des modèles déjà existants (le modèle de culture CHN, le modèle Terranimo simulant les risques de tassement des sols), et sur les connaissances d'experts.

Les objectifs du projet J-Distas sont les suivants :

- **Objectif 1** : mettre au point la plateforme d'outils J-Distas, qui constituera une aide à la décision stratégique pour les agriculteurs afin de pouvoir préserver la qualité physique des sols, ce qui permettra également de limiter les conséquences de certaines opérations culturales sur la fertilité des sols.
- **Objectif 2** : évaluer la capacité de l'outil J-Distas à simuler des jours disponibles pour des opérations culturales variées et dans des contextes agronomiques français.
- **Objectif 3** : évaluer la sensibilité de l'outil J-Distas aux données d'entrées afin de déterminer les variables qui doivent être renseignées avec le plus de précision pour que les résultats obtenus soient fiables.

Ce mémoire est une contribution à l'objectif 3 du projet J-Distas. A cet effet, nous avons articulé notre question de recherche ainsi : « quelle est la sensibilité de l'outil J-Distas aux données d'entrée ? Ont-elles un effet faible sur la sortie de ce modèle (le nombre de jours disponibles), ce qui implique qu'elles puissent être fixées avec confiance à n'importe quelle valeur de leur intervalle de variation sans affecter les résultats, ou un impact fort impliquant la nécessité de les renseigner avec plus de précaution ? ». L'objectif spécifique de cette étude est de mettre en place les bases d'une analyse de sensibilité pour l'outil J-Distas et de l'appliquer pour une opération culturale. Et pour ce faire, notre mémoire est organisé en 5 parties.

Les trois premières parties sont consacrées à la présentation de la problématique de tassement de sol, du concept de « Jours Disponibles » et des outils et/ou modèles de calculs disponibles, ainsi que des notions de l'analyse de sensibilité. Les deux dernières parties du mémoire présentent les résultats relatifs aux simulations obtenues avec l'outil J-Distas et à l'analyse de sensibilité de cet outil, mises en œuvre de manière à estimer le nombre de jours disponibles pour une opération culturale spécifique dans trois contextes pédologiques.

Partie I

I. Présentation de la problématique de tassement de sol

Dans cette partie nous allons d'abord décrire le phénomène de tassement qui est causé par les machines agricoles et ses enjeux pour les sols. Ensuite, nous ferons un état des lieux des problèmes de tassement en Europe avec un focus sur la France. Enfin, nous présenterons les modes de préventions possibles.

I.1. Tassement de sols

I.1.1. Définition et enjeux

Selon le Petit lexique de pédologie (Baize, 2004), le tassement du sol se définit par la diminution du volume total de porosité d'un volume de sol ou d'un horizon dans son ensemble, agissant sur la macroporosité et/ou sur la porosité texturale. Le tassement s'opère verticalement et résulte soit de phénomènes pédogénétiques naturels très lents comme la décarbonatation ou l'éluviation, soit de phénomènes naturels plus rapides comme par exemple les pluies abondantes sur des sols battants, soit d'actions humaines volontaires (roulage) ou involontaires (piétinement des animaux, charge excessive des tracteurs et des engins agricoles ou forestiers) (Commission, 2008). Il entraîne une diminution de l'aération et du réservoir en eau et par conséquent, des difficultés d'enracinement. La notion de tassement est proche de celle de compactage qui peut être définie comme la diminution de la porosité d'un horizon sous l'action de la pression exercée par des engins agricoles (initiée par des roues, des chenilles et des rouleaux) (Métais, 2019) ou par le piétinement des animaux lorsque la microporosité est affectée, le compactage est difficilement réversible. Le tassement est donc une forme de compactage du sol qui est plus sévère, car elle diminue totalement la perméabilité des sols à l'eau contrairement au compactage. Dans ce mémoire, nous nous intéressons au tassement induit par les machines agricoles, qui constitue donc une action involontaire.

Le tassement du sol conduit au réarrangement des agrégats et/ou des particules solides du sol ainsi que du réseau de pores. L'orientation, la taille et la forme des agrégats du sol sont la preuve du tassement du sol. Les agrégats sont orientés horizontalement (structure plate), ils sont d'autant plus aplatis que l'intensité du tassement est forte, ils peuvent être totalement détruits si le tassement est trop sévère (Richard, 2008).

Le tassement du sol est donc une forme de dégradation physique qui entraîne une densification et une déformation du sol, conduisant ainsi à une modification de la structure du sol et se

traduisant par une réduction de la porosité et une modification du réseau de pores (taille et forme des pores, connectivité). Ces modifications de structure impactent les processus physiques, chimiques et biologiques du sol, et donc son fonctionnement. Le tassement du sol causé par le passage des engins agricoles a des conséquences néfastes sur l'aération du sol (réduction de la perméabilité à l'air), l'infiltration et l'écoulement de l'eau, le cycle des nutriments, la production agricole et forestière et l'activité biologique. Le tassement induit une augmentation de résistance du sol à la pénétration, notamment des racines. Le système racinaire des plantes devient inefficace à cause d'une mauvaise exploitation du sol, à la fois en volume et en profondeur (Figure 1). Les activités des micro-organismes ou de la macrofaune (notamment lombricienne) peuvent être réduites ou même bloquées dans des cas extrêmes. Pourtant, les galeries creusées par des vers de terre sont souvent indispensables pour que les racines prospèrent dans les horizons profonds afin de pouvoir s'alimenter en eau et autres nutriments du sol. Le tassement peut réduire la capacité d'infiltration de l'eau et augmenter le ruissellement et donc le risque d'érosion hydrique du sol (Horn et al., 1995 ; Richard, 2008).

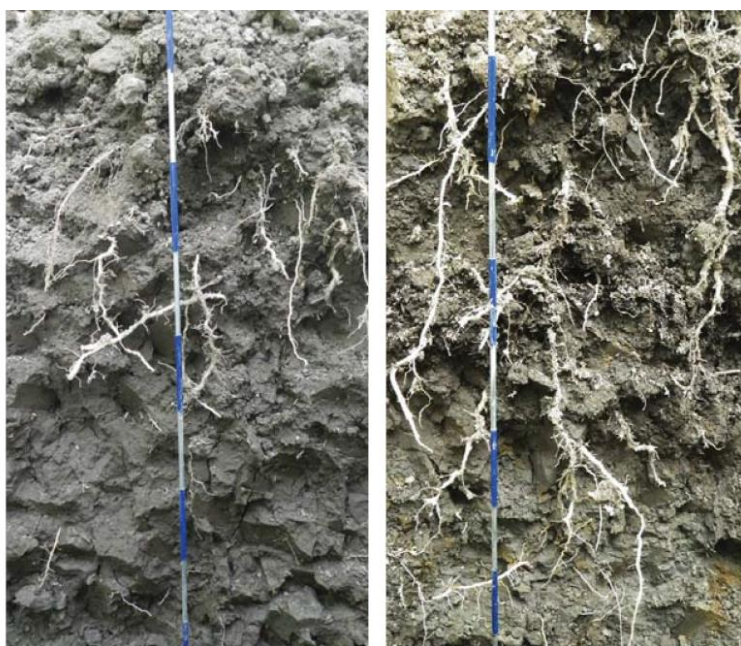


Figure 1 : Effet du tassement sur l'enracinement (source : INRAE). A gauche un sol tassé (les racines sont peu nombreuses) et à droite un sol non tassé (les racines sont bien développées et prospectent toute l'épaisseur du sol).

Le passage de tracteurs lourds pendant les opérations culturales (labour ou récolte par exemple) est une cause majeure du tassement du sol (Figure 2). Le tassement peut impacter la couche arable et les horizons profonds, par exemple sur les terres arables labourées chaque année. Une caractéristique des sols compactés est la formation d'une couche compressée et dense, causée par les pneus du tracteur (Figure 2). Cette couche est donc moins perméable aux racines, à l'eau

et à l'oxygène. Contrairement à la couche arable dans un système avec labour, les horizons profonds ne sont pas ameublés chaque année, le tassement devient cumulatif et au fil du temps, une couche homogène et tassée se crée (Richard, 2008) (Figure 3). Les constituants solides formant la structure des sols, à savoir les particules de sable, de limon et d'argile formant des agrégats de forme et de taille variables, se rapprochent les uns des autres, sous l'effet de la pression exercée lors du passage d'un tracteur pour former une couche de sol compressée ou tassée (Figure 3). Or, une bonne structure du sol, c'est-à-dire un sol poreux, bien aéré, qui facilite le développement des racines (Figure 1), l'infiltration de l'eau (Figure 4) vers les horizons profonds et favorise l'activité biologique, est une condition essentielle pour la croissance des plantes (Annexe 2).



Figure 2 : Présentation d'un tassement superficiel après le passage d'une machine agricole (source : Dilepix²)

² <https://www.dilepix.com/blog/guidage-automatique-engins-agricoles>



Figure 3 : Tassement d'un sol (source : INRAE).



Figure 4 : Mauvaise infiltration de l'eau dans un sol tassé.

La susceptibilité du sol au tassement est la probabilité que le sol se comprime lorsqu'il est exposé à une contrainte qui dépasse sa résistance (Figure 2). Elle peut être faible ou très élevée selon les propriétés du sol et un ensemble de facteurs externes comme le climat, l'occupation du sol, etc. Les sols bien structurés combinant de bonnes propriétés physiques et les sols sableux à structure mono-granulaire peuvent être très résistants aux passages des roues des machines. Pour certaines cultures par exemple, les racines jouent un rôle de liaison et elles augmentent l'élasticité et la résistance d'un sol au tassement (Richard, 2008).

A ce stade de notre travail, nous pouvons affirmer que la texture des sols joue un rôle extrêmement complexe sur la sensibilité des sols au tassement. En effet, un sol n'est jamais

constitué d'un seul type de particules. L'assemblage des particules forme la texture des sols et cette dernière est caractérisée par la teneur en argile (particules de diamètre $< 2 \mu\text{m}^3$), en limon (entre 2 et 50 μm) et en sable (entre 50 et 2000 μm) (voir Annexe 2). De façon générale, la compressibilité des sols, i.e. leur propriété à diminuer de volume sous l'effet d'une pression, a tendance à augmenter avec la teneur en argile (Tableau 1), les rendant très susceptibles au tassement jusqu'à environ 35 % à 50 % d'argile, puis à diminuer au-delà de cette teneur (Imhoff et al., 2004). En effet, un sol sableux est moins sensible au tassement (Tableau 1) qu'un sol argileux ayant la capacité d'affecter les propriétés mécaniques du sol (Imhoff et al., 2004). En revanche, un sol limono-sableux reste très vulnérable au tassement puisque les grosses particules de sable peuvent laisser assez d'espaces qui peuvent être remplis par les particules plus fines de limons (Dexter, 2004). Le Tableau 1 montre une classification de la sensibilité des sols au tassement en fonction de la texture définie par Jamagne en 1967.

Tableau 1 : Classement des textures de sols selon leur sensibilité au tassement (Jamagne, 1967).

Textures	Sensibilité au tassement					
	très faible	faible	modérée	assez importante	importante	très importante
Sable						
Limon léger						
Limon léger sableux						
Argile sableuse						
Argile lourde						
Sable limoneux						
Sable argileux						
Limon moyen						
Limon moyen sableux						
Argile						
Limon sableux						
Limon argileux						
Limon sablo-argileux						
Argile limoneuse						
Limon argilo-sableux						

En plus de la texture, l'humidité du sol au moment de l'opération culturale a aussi une influence dominante sur la susceptibilité du sol au tassement. Les sols structurés secs sont solides et ont une faible susceptibilité au tassement. Cependant, les sols sableux extrêmement secs peuvent

³ μm : micro mètre

être déformés et tassés assez facilement. Au fur et à mesure que la teneur en eau du sol augmente, la susceptibilité du sol au tassement va augmenter. Le tassement d'un sol humide peut entraîner la destruction complète de la structure du sol et des macropores. L'augmentation de la teneur en matière organique tend à réduire la susceptibilité du sol au tassement et à augmenter son élasticité (European Commission, 2008).

I.1.2. Catégorie de tassement

Il convient de distinguer deux types de tassements : les tassements superficiels et les tassements profonds (Métais, 2019).

On parle de tassements superficiels lorsqu'ils affectent les 10 premiers centimètres de sol et sont le plus souvent provoqués par une succession répétée de passage de machines agricoles. Ces tassements sont d'autant plus présents lorsque la pression exercée sur le sol est forte ou lorsqu'on utilise des pneus étroits. Les tassements profonds sont ceux qui affectent les 20-30 cm de profondeur ou plus. Ces tassements dépendent d'abord de l'humidité du sol, puis vient la charge (poids) totale de la machine. Plus cette charge augmente, plus le tassement se propage en profondeur (Métais, 2019).

Le tassement superficiel ou en surface est plus réversible que le tassement en profondeur qui affecte la couche située en dessous de la profondeur normale de travail. Le tassement en profondeur est également plus persistant, cumulatif et invisible à la surface (Voorhees, 2000). Il convient donc d'éviter dans la mesure du possible les tassements profonds.

I.1.3. Le tassement des sols : un processus complexe aux multiples impacts

Dans les sols, les espaces de vide d'une taille supérieure à 75 μm sont connus sous le nom de macropores. Ils peuvent être créés par des processus physiques (cycles d'humectation/dessiccations, opérations culturales) ou biologiques (croissance des racines des plantes, activités des lombrics). Ces macropores (porosité structurale) permettent à l'air et à l'eau de pénétrer profondément dans le sol et, dans une certaine mesure, déterminent la qualité physique et biologique du sol. Ces derniers sont les pores les plus vulnérables au tassement du sol (Richard et al., 2001). Les pores de taille inférieure à 75 μm (mésoporosité et microporosité) sont plus difficilement impactés par le tassement, mais s'ils le sont c'est un phénomène non réversible.

Il faut souligner que la perte de la macroporosité et de la continuité des pores réduit fortement la capacité d'infiltration de l'eau et de l'air dans le sol (European Commission, 2008). La réduction de l'infiltration de l'eau peut entraîner un ruissellement de surface, qui finit par provoquer l'érosion des sols et le transport de nutriments et de produits agrochimiques vers les eaux libres, voire des inondations. La réduction de la perméabilité à l'air peut engendrer une mauvaise aération du sol qui participe à la réduction de la croissance des plantes. De plus, la déformation des agrégats du sol et une densité apparente plus élevée augmentent la résistance du sol. Cela limite la croissance des racines, qui n'arrive pas à se prospecter dans le sous-sol, ce qui peut entraîner une plus grande vulnérabilité de la culture aux maladies (Annexe 2). Le tassement du sous-sol est une forme cachée de dégradation du sol qui peut affecter toutes les zones agricoles. Il se traduit par une diminution progressive des rendements et une augmentation progressive des problèmes d'engorgement (occupation de la totalité de la porosité d'un horizon par l'eau) (European Commission, 2008).

Le tassement du sol entraîne aussi des pertes substantielles de services écosystémiques. Selon une étude réalisée dans le projet RECARE, la perte annuelle à long terme du rendement agricole a été estimée à 6% entre 1960 à 2010, soit plus d'un milliard d'euros par an en Europe (Schjønning, 2020). L'impact du tassement du sol est plus important les années où les périodes de sécheresse ou d'humidité sont extrêmes. Des réductions de rendement des cultures de plus de 35% ont été mesurées (Schjønning, 2020). Le tassement des horizons profonds du sol s'avère très persistant, même dans les sols présentant un retrait et un gonflement ou un gel profond annuel. Une réduction des rendements et de la teneur en azote des cultures a été détectée 17 ans après un seul événement de compactage avec des charges de roues de 50 kN ou 5 000 kg (Schjønning, 2020).

Bien que le tassement du sol soit perçu par les acteurs de l'agriculture et de l'environnement comme un enjeu pour les écosystèmes agricoles et forestiers, et qu'il existe de nombreuses études sur les impacts induits par le passage des engins agricoles, il reste difficile de quantifier ses coûts économiques et écologiques. Cela rend la notion de sol dégradé ou de sol « trop tassé » difficile à décrire pour les raisons suivantes (Richard, 2008) :

- Même si le tassement est défini comme une baisse de la porosité, il est quand même difficile de qualifier un sol « tassé » en se basant sur l'épaisseur du sol en question, le degré de porosité structurale, les vitesses de transfert de flux, la résistance à la déformation, etc., car cela dépend des processus auxquels on s'intéresse.

- Le tassement est très variable spatialement, car il affecte rarement toute la superficie d'une même parcelle, mais seulement des bandes de la largeur des pneus des machines agricoles ou entre parcelles. Sa gravité va donc dépendre des machines agricoles utilisées et des conditions de leur utilisation.
- La macroporosité d'un sol tassé peut être régénérée de façon naturelle sous l'effet de l'activité biologique, par perforation des racines et des lombrics, ou sous l'effet d'action climatique (fissuration du sol). Ceci est extrêmement important en système de sol non travaillé et dans les forêts, où la structure du sol est mécaniquement difficile à restaurer. Mais ces processus sont mal modélisés et la vitesse de la reconstitution de la porosité du sol en fonction des conditions du milieu reste mal connue.
- Les effets du tassement sont nombreux et toujours indirects : il n'y a pas de lien direct entre le tassement d'une part, les rendements, le lessivage du nitrate, la production de gaz à effet de serre, l'érosion et la biodiversité d'autre part. Même s'il existe des résultats d'expérimentations sur l'évolution des rendements des espèces cultivées par rapport au niveau de tassement des horizons de surfaces, ses effets sur l'environnement sont beaucoup moins étudiés.
- Des techniques culturales peuvent corriger certaines conséquences du tassement comme par exemple l'irrigation ou l'augmentation de la fertilisation azotée par exemple. Ceci a probablement dû masquer les effets du tassement sur les productions agricole et forestière et a contribué à augmenter certains problèmes environnementaux.

I.2. Etat des lieux des problèmes de tassement

Tous les sols agricoles des pays développés présentent un certain degré de susceptibilité au tassement des horizons profonds. Il est indéniable que ce phénomène cause d'importants dommages économiques et écologiques à la société (Graves et al., 2015). Selon des estimations réalisées il y a près de 30 ans, la superficie des dégradations de sols liés au tassement en Europe pouvait égaler ou dépasser 33 millions d'hectares (Oldeman et al., 1991), ce qui correspond à environ un tiers de toutes les terres arables en Europe. Des recherches plus récentes ont montré que le tassement des sols est le type de dégradation physique du sol le plus répandu en Europe centrale et orientale, les autres menaces identifiées étant l'érosion, la diminution de la matière organique, la salinisation et les glissements de terrain. Environ 25 millions d'hectares sont

considérés comme légèrement tassés, tandis que 36 autres millions d'hectares sont plus gravement touchés (European Commission, 2008).

Une carte de susceptibilité naturelle des sols au tassement a été élaborée pour évaluer et délimiter les zones prioritaires liées au tassement des sols à l'échelle européenne, conformément à la stratégie thématique pour la protection des sols adoptée par la Commission européenne le 22 septembre 2006 (Figure 5). La connaissance des zones prioritaires doit aider les décideurs ainsi que les gestionnaires des sols et les environnementalistes à gérer l'utilisation des sols dans ces zones de manière à prévenir ou à diminuer la menace de tassement (European Commission, 2008).

Cette carte du tassement des sols (Figure 5) traite exclusivement de la susceptibilité des sols au tassement, ce qui est très important à des fins de prévention, mais ne montre pas l'état réel des sols européens. Cela se justifie par le fait qu'il n'y a pas assez de données pour une évaluation de l'état réel et des changements significatifs dans l'environnement du sol au cours de l'année, alors que l'état réel du sol, concernant le phénomène de tassement, varie au cours du temps. Cela peut être la raison de possibles divergences dans la prise de décisions sur la façon de gérer les sols touchés et l'état des sols eux-mêmes. La carte de susceptibilité du sol au tassement au niveau européen est surtout utile pour prendre des décisions sanitaires, préventives et de gestion appropriée.

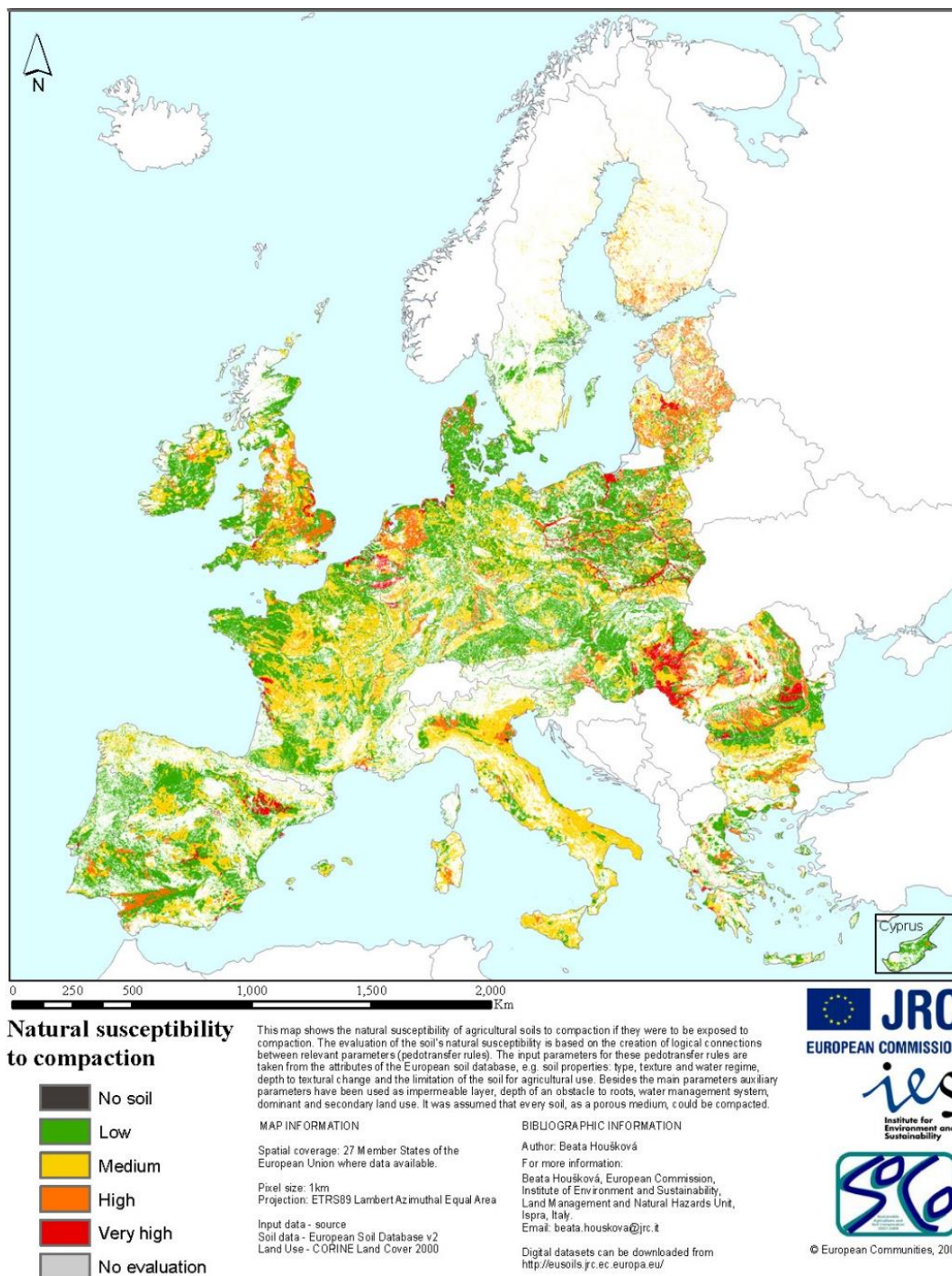


Figure 5 : susceptibilité naturelle des sols européens au tassement (European Commission, 2008).

I.2.1. Evolution du poids des machines et impact sur le tassement

Le tassement du sol est une menace majeure pour l'agriculture européenne, en raison des évolutions structurelles et technologiques de l'agriculture depuis la Seconde Guerre mondiale. Ces évolutions ont conduit à l'utilisation de machines de plus en plus grandes et lourdes. Pour assurer l'efficacité des travaux et rester compétitifs sur les marchés agro-alimentaires, les

PRÉVOIR LES JOURS DISPONIBLES POUR RÉUSSIR LES OPÉRATIONS CULTURALES ET ÉVITER LES TASSEMENTS DES SOLS EN GRANDES CULTURES

agriculteurs ont opté pour des machines de plus en plus grandes. Cela a entraîné une augmentation des charges sur le sol et comme le tassement des horizons profonds est principalement déterminé par la charge des roues, il a donc été augmenté de façon spectaculaire au cours des dernières années (Schjønning et al., 2015).

Une étude réalisée au Danemark sur la base de données historiques a montré que les charges par roue sur l'essieu avant avaient augmenté de façon linéaire entre 1958 et 2009, passant d'environ 1,5 Mg (1 méga gramme est égal à 1 tonne) à près de 9 Mg, ce qui correspond à une augmentation annuelle d'environ 0,14 Mg an⁻¹ (soit une tonne supplémentaire tous les sept ans) (Figure 6a). Deux ensembles de données de machines ont été utilisés pour analyser l'évolution des poids : des données sur des moissonneuses-batteuses et des données sur des tracteurs. A cette époque, la quasi-totalité des surfaces agricoles en Europe incluant des céréales dans la rotation des cultures étaient parcourus par des moissonneuses-batteuses utilisant les mêmes charges par essieu que le Danemark (Schjønning et al., 2015). Dans la même étude, les données sur le poids des tracteurs concernaient des machines fabriquées par John Deere (Deere et Company, Moine, IL, USA). John Deere est l'un des plus anciens fabricants de tracteurs encore en production aujourd'hui (le premier tracteur produit en série a été introduit en 1923 : le modèle John Deere D). Les données collectées montrent l'évolution historique du poids des tracteurs en général et la charge sur les roues a été calculée à partir du poids de ces derniers. Pour simplifier, Schjønning et al. (2015) ont supposé une répartition du poids entre l'essieu avant et l'essieu arrière de 40%:60% (Pichlmaier et Honzek, 2011). Les charges sur les roues des tracteurs sont donc passées d'environ 1,5 Mg en 1960 à 4 Mg en 2000, correspondant à une augmentation annuelle d'environ 0,06 Mg an⁻¹, soit une tonne supplémentaire tous les 17 ans (Figure 6b). Les charges dynamiques des roues pendant les opérations de terrain (par exemple le travail du sol) sont plus élevées que les charges statiques. La ligne pointillée de la Figure 6b indique la charge sur la roue arrière de la roue dans le sillon lors d'un labour conventionnel (Keller et al., 2019).

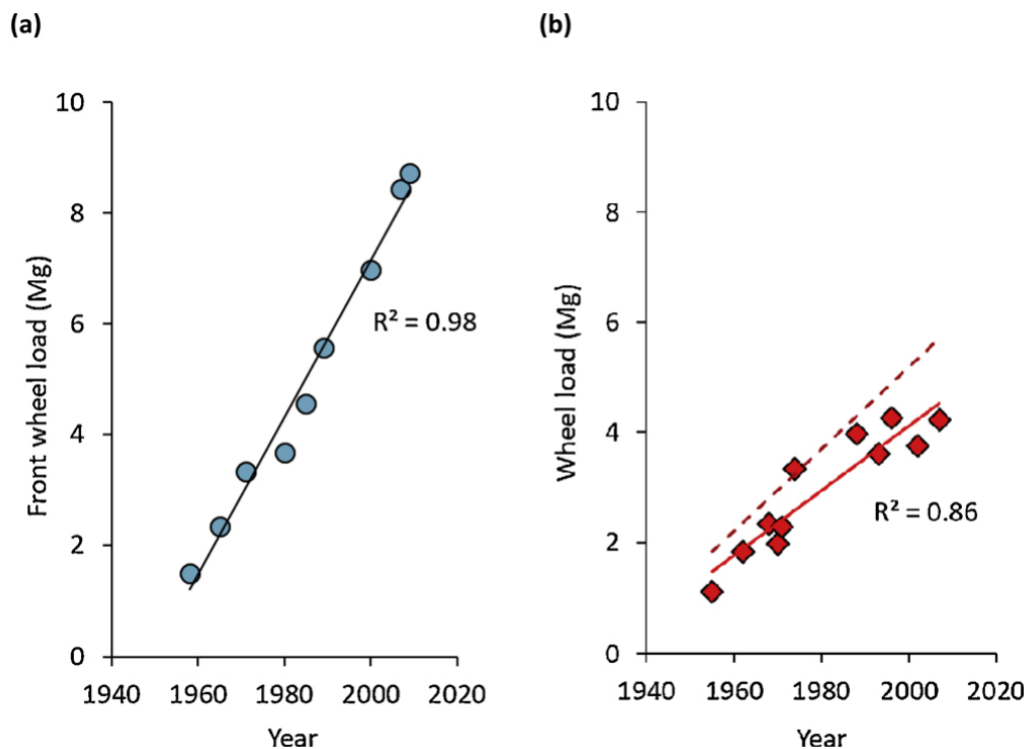


Figure 6 : Évolution historique a) des charges sur les roues avant des moissonneuses-batteuses (Schjønning et al., 2015) et b) des charges sur les roues arrière des tracteurs (la ligne en pointillée représente l'augmentation de 25 % de la charge de la roue arrière) (Brunotte et al., 2012).

Pour limiter le risque de tassement, la diminution de la charge (poids) des machines agricoles doit rester une priorité, car la contrainte exercée sur le sol est liée à cette charge, c'est-à-dire au poids supporté par les roues. Pourtant, les tendances actuelles montrent une extrême augmentation de cette charge (Figure 6). Selon une simulation faite par Agro-Tansfert avec l'outil Terranimo (Stettler et al., 2010), il a été constaté qu'un pneu plus étroit exerce une contrainte ou pression plus élevée sur un sol par rapport à un pneu de plus grand diamètre pour un même poids soutenu (Figure 7). Les pneus modernes sont plus volumineux que les anciens pneus, mais comme le montrent Schjønning et al. (2015), l'évolution des surfaces de contact pneu-sol ne suit pas l'évolution des charges des roues. En d'autres termes, l'augmentation de la surface de contact pneu-sol est plus lente que l'augmentation de la charge des roues, ce qui entraîne une augmentation nette de la contrainte sur le sol. Les pressions de gonflage des pneus ont augmenté avec l'augmentation des charges sur les roues (Schjønning et al., 2015), ce qui contribue à faire augmenter le risque de tassement des sols.

En outre, même si les constructeurs ont tenté de faire évoluer les pneus pour limiter leur impact sur les sols, les caractéristiques des pneus en tant que telles (par exemple, pneus diagonaux par

rapport aux pneus radiaux) ont un effet limité sur la contrainte du sol. Une étude récente (Ten Damme et al., 2019) n'a pas montré de différence entre un pneu diagonal ("ancien") et un pneu radial, lesquels ont été testés à dimension, pression de gonflage et pression d'utilisation constantes.

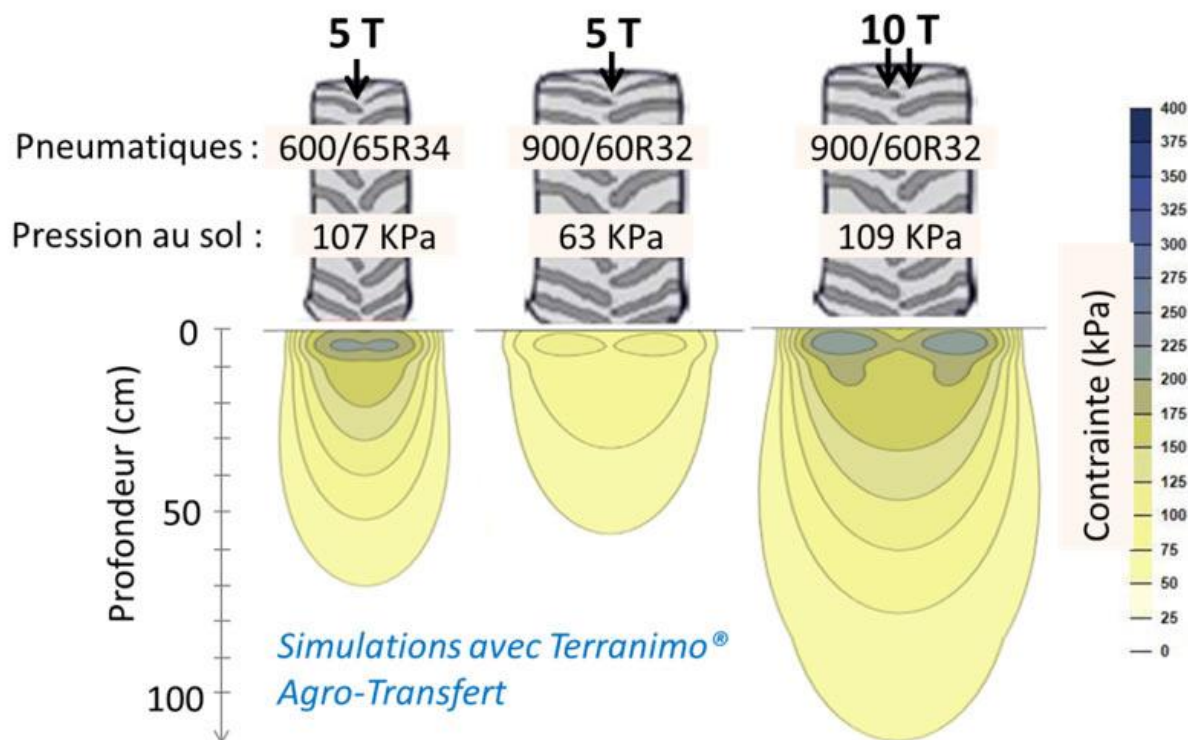


Figure 7 : Représentation de la pression exercée sur le sol un pneu étroit ou large en fonction de la charge (Métais, 2019).

Les machines utilisées dans l'étude des Danois (Schjønning et al., 2015), comme les moissonneuses-batteuses et/ou les tracteurs, sont représentatives dans une grande partie de l'Europe et de l'Amérique du Nord, et peut-être ailleurs (par exemple en Australie). Il faut également noter que des engins plus lourds sont utilisés par exemple pour la récolte des pommes de terre ou des betteraves à sucre, avec des charges par roue actuelles supérieures à 10 Mg (Schjønning et al., 2015).

En conséquence, la contrainte mécanique exercée sur les couches des horizons profonds par les engins habituellement utilisés a été multipliée par deux pour les couches supérieures des horizons profonds et jusqu'à cinq fois pour les couches profondes au cours de la même période (Schjønning et al., 2015).

D'autres observations ont également montré la même tendance, car selon le rapport publié par la Commission Européenne en 2008, les zones dégradées par le tassement du sol continuaient d'augmenter à cause du fait que les charges sur les roues dans l'agriculture ne cessaient

d'augmenter. Vingt ans avant ces observations, des charges sur roues de 50 kN (5000 kg) étaient considérées comme très élevées (European Commission, 2008). Aujourd'hui, des charges sur roues allant jusqu'à 130 kN sont utilisées lors de la récolte des betteraves à sucre. Les tonnes à lisier automotrices modernes, dotées d'un équipement d'injection avec des charges par roue de 90 à 120 kN, sont utilisées au début du printemps sur les sols humides. De gros pneus avec une pression de gonflage d'environ 200 kPa sont nécessaires pour supporter des charges par roue aussi élevées. Même sur des sols moyennement résistants, des tassements allant jusqu'à 80 cm sous la surface ont été mesurés sous de telles charges (European Commission, 2008). Le résultat est que la superficie des sols tassés en profondeur est de plus en plus grande et les sols européens sont plus menacés que jamais.

Des expériences ont montré que le trafic à forte charge de roues dans des conditions humides entraîne des pertes de rendement à long terme de l'ordre de 6 à 12 %. Sur le terrain, cela signifie des pertes de rendement de 6 % dans la production de céréales à petits grains ou une perte de valeur du produit de 97 millions d'euros au Danemark, 487 millions d'euros en Allemagne et 713 millions d'euros en France (Voorhees, 2000 ; Bennetzen, 2016).

Depuis les premières observations, le poids des machines agricoles n'a cessé d'augmenter. Par exemple, les charges sur roues des moissonneuses-batteuses ont augmenté d'environ 65 % entre 1989 et 2009 (Schjønning et al., 2015). Par conséquent, les contraintes mécaniques exercées par les machines d'aujourd'hui peuvent dépasser la résistance de nombreux sols arables (Schjønning et al., 2015, Keller et al. 2019). Il est raisonnable de supposer que l'augmentation des charges des machines agricoles a exacerbé l'étendue et la gravité du tassement des sols, mais il existe peu de connaissances quantitatives sur l'évolution des niveaux de tassement dans les sols arables.

I.2.2. Le risque de tassement de sol en France

En France métropolitaine, des expérimentations réalisées par Arvalis ont permis de mettre en évidence les conséquences du tassement, causé par des passages d'engins répétés aux mêmes endroits, sur le rendement de nombreuses espèces de culture dans trois régions différentes et sur une période de cinq ans. Les régions concernées sont l'Île-De-France (Boigneville), l'Occitanie (Baziège) et les Pays de la Loire (Angers et La Jaillière). Il apparaît que la diminution du rendement reste systématique et comprise entre 5 et 30 %, quel que soit le système agricole (irrigué ou non) et les espèces cultivées, excepté le blé à Boigneville (Figure 8). Les cultures printanières sont généralement très sensibles au tassement des sols comme c'est

le cas du maïs. Etant une culture de printemps, le maïs est particulièrement sensible au tassement des sols. Les pertes de rendement pour cette culture allaient de 25 % pour des maïs grain en sol argileux en Occitanie (Baziège) à 35 % pour des maïs fourrage en sol limoneux dans les Pays de la Loire (La Jaillière) (Figure 8). Les racines du maïs étant très grosses, elles peuvent avoir beaucoup plus de mal à traverser les zones compactes que les autres céréales à pailles, comme le blé, qui ont des racines plus fines (Annexe 2) (Labreuche et Métails, 2020).

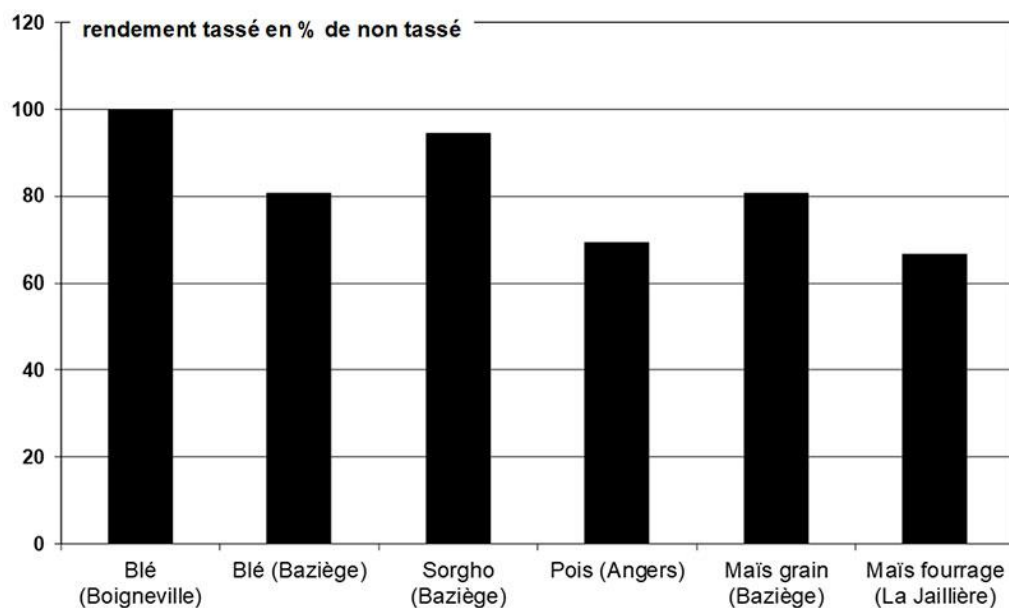


Figure 8 : Effet du tassement du sol sur le rendement de plusieurs cultures (Labreuche et Métails, 2020). Essais réalisés Baziège (31) en sol argileux, à Boigneville (91) en limon argileux et la Jaillière (44) en limon drainé.

Comparativement aux résultats présentés par Labreuche et Métails (2020), Lefebvre (2010) avait montré en France une forte susceptibilité au tassement des sols cultivés en blé : un risque de tassement très élevé touchait environ 15 % des sols agricoles et un tiers est concerné par un risque élevé, même si de fortes disparités spatiales sont observées (Figure 9). Nous pouvons par exemple voir sur la carte de France de sensibilité au tassement des sols agricoles cultivés en blé que l'Ouest et l'Est sont spécifiquement touchés, excepté les départements Haut-Rhin, Bas-Rhin et le massif des Alpes. A une échelle départementale, le risque est très élevé ou élevé pour plus de deux tiers des sols agricoles dans le massif vosgien, en Meurthe-et-Moselle, en Meuse, en Corrèze, en Creuse ou encore dans le Tarn et le Tarn-et-Garonne (Lefebvre, 2010).

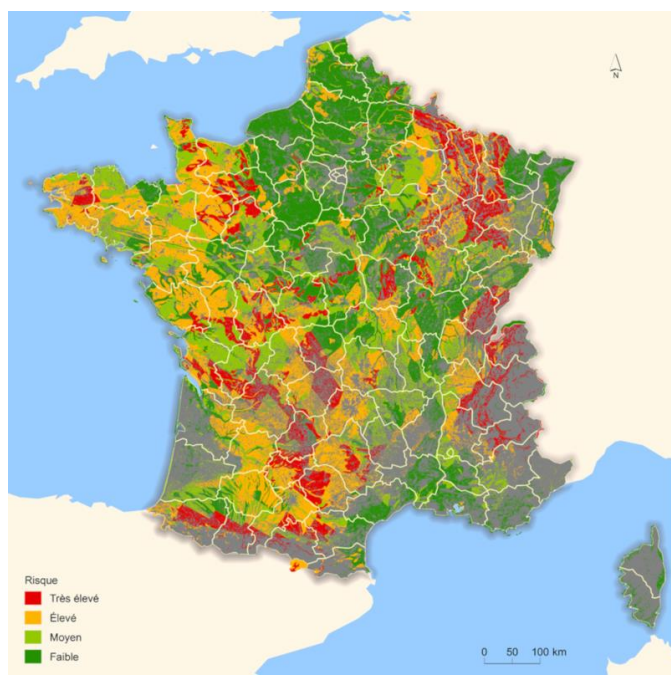


Figure 9 : Sensibilité au tassement des sols agricoles cultivés en blé en France (Lefebvre, 2010).

I.2.2.1. Risque de tassement calculé sur des sols en France

Des calculs du risque de tassement sur des sols en France réalisés en fonction de la profondeur de sol, du type de sol et du type de machine utilisé ont montré le niveau de risque de tassement par rapport à l'épaisseur de ressuyage des sols. Sachant que le ressuyage est la capacité d'évacuation de l'eau d'un sol (Labreuche et Métails, 2020), les résultats de cette étude ont pu montrer que même lorsque les 10 ou 20 premiers centimètres de sol sont bien ressuyés, les horizons plus profonds peuvent ne pas encore être ressuyés, ce qui rend encore le sol susceptible au tassement en profondeur en cas de passage des machines. C'est pourquoi il convient de s'assurer que le sol est bien ressuyé sur toute l'épaisseur de la couche arable avant d'envisager une opération culturale. L'outil Terranimo utilisé pour réaliser ces calculs permet de prévoir les risques de tassement en fonction du poids des machines agricoles et de l'état du sol, et permet les deux conclusions suivantes (Tableau 2) : 1) Lorsque le sol est bien ressuyé sur les 20 premiers centimètres de profondeur et que les horizons inférieurs ne sont pas ressuyés, un risque de tassement reste probable entre 20 à 40 cm ; 2) En revanche, lorsque le sol est bien ressuyé jusqu'à 40 cm de profondeur, le risque de tassement est réduit ou supprimé.

Il faut également souligner que le risque de tassement est d'autant plus important que la machine agricole est lourde et puissante. Car, Labreuche et Métails (2020) avaient pu montrer que l'utilisation d'une machine de 110 chevaux pour un poids total de 7 tonnes,

comparativement à une machine de 130 chevaux et de 11 tonnes, permettait de réduire le risque de tassement de 10 à 20 cm de profondeur dans des sols limoneux et argileux ressuyés (Tableau 2) (Labreuche et Métais, 2020).

Tableau 2 : Risque de tassement en fonction du type de tracteur utilisé, du type de sol, de l'épaisseur de sol ressuyée.

profondeur	Sol limoneux				Sol argileux			
	sol ressuyé sur 20 cm		sol ressuyé sur 40 cm		sol ressuyé sur 20 cm		sol ressuyé sur 40 cm	
	110 cv (*)	130 cv (**)	110 cv	130 cv	110 cv	130 cv	110 cv	130 cv
10	Sévère	Sévère	Sévère	Sévère	Faible	Faible	Faible	Faible
20	Modéré	Sévère	Modéré	Sévère	Faible	Faible	Faible	Faible
30	Modéré	Sévère	Faible	Modéré	Modéré	Sévère	Faible	Faible
40	Modéré	Modéré	Faible	Faible	Faible	Modéré	Faible	Faible
50	Faible	Modéré	Faible	Modéré	Faible	Modéré	Faible	Modéré
60	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
70	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
80	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
90	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
100	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible

(*) 110 chevaux = tracteur de 110 chevaux + vibroculteur pour un poids total de 7 t

(**) 130 chevaux = tracteur de 130 chevaux + herse rotative pour un poids total de 11 t

(Labreuche et Métais, 2020)

I.3. Prévention des tassements

Après avoir observé les conséquences du tassement sur les sols et les productions agricoles, il devient alors nécessaire de trouver des solutions durables pour limiter ou éviter le risque de tassement dans les sols. Des mesures préventives existent afin d'anticiper ce risque. Cette nécessité et les différents types de prévention qui existent seront décrits dans les lignes suivantes.

I.3.1. Nécessité de mettre en place des mesures de prévention des tassements des sols

La régénération naturelle des horizons tassés est lente, que les tassements soient superficiels ou profonds. Dans le meilleur des cas, cette régénération peut nécessiter au moins 6 mois (Richard, 2008). Une bonne gestion de la couche arable (par exemple par la rotation des cultures et le maintien de la matière organique du sol) peut augmenter sa résistance aux dommages causés par le tassement. Cependant, un tassement profond ne peut être évité qu'en réduisant les contraintes des machines (principalement le poids des roues). Cela veut dire que d'autres moyens de prévention doivent être envisagés afin d'améliorer la résistance du sol ou de limiter la contrainte appliquée. Il faut pour cela attendre le ressuyage du sol avant d'entrer sur une

parcelle. La structure du sol doit être friable en surface comme dans les horizons sous-jacents (Métais, 2019).

Le risque de tassement est de nature systémique (très complexe). Cela oblige les décideurs à chercher à équilibrer différentes considérations, notamment la rentabilité, l'efficacité, les conditions météorologiques, la main-d'œuvre et le calendrier de planification des passages des engins agricoles dans les champs. Par ailleurs, les agriculteurs donnent rarement la priorité à la prévention du tassement du sol à cause du fait que les coûts des mesures préventives ne sont pas récompensés par des bénéfices immédiats, alors que ces mesures sont coûteuses. A court terme, il peut toujours être plus rentable pour les agriculteurs d'utiliser des machines lourdes et de compacter le sol que d'adopter des mesures préventives (Schjønning, 2020). Néanmoins, la persistance et les effets néfastes du tassement nécessitent une intervention politique afin de garantir les rendements, de s'adapter au changement climatique et de préserver les services écosystémiques des sols pour les générations futures.

I.3.2. Les différents types de prévention

Dans le rapport du Projet GESSOL (Richard, 2008), trois types de mesures préventives au tassement ont été identifiées :

- 1) Il faudrait tout d'abord « éviter les situations risquées à travers des choix stratégiques », en tenant compte de certains facteurs dont les plus importants sont :
 - Les cultures : ne plus utiliser les cultures pour lesquelles l'utilisation des machines agricoles est indispensable en condition de sol humide,
 - Les pratiques : certaines pratiques à haut risque peuvent être évitées (labour avec roulage par exemple),
 - Les équipements : choisir des équipements qui peuvent limiter au maximum la contrainte exercée sur le sol,
 - Les variétés : sélectionner des variétés à cycle court dans les saisons estivales.
- 2) Ensuite, il est indispensable de localiser les zones tassées dans le sol afin de pouvoir les éviter lors des passages dans les champs.

- 3) Et enfin, il faudrait identifier les jours disponibles pour réaliser les opérations culturales avec les machines agricoles, en fonction du taux d'humidité du sol et en vue d'éviter les tassements sévères.

L'outil qui pourrait permettre de faire une prévention « stratégique⁴ » sur le long terme et qui serait adapté à des conditions pédoclimatiques connues restait alors à construire à partir des modèles de prévention des risques de tassements et des jours disponibles pour réaliser les opérations culturales dans de bonnes conditions d'efficacité. En ce qui a trait aux choix « tactiques⁵ », d'après Richard (2008), un groupe d'expert avait déjà mis au point un logiciel (connu sous le nom de « ProFor ») qui permettait de prédire les risques de tassement en forêt pour des engins, une typologie de sols et en prenant en compte également l'état hydrique du sol. Aujourd'hui, nous pouvons aller plus loin en matière de prévention avec la valorisation des prévisions météorologiques. En effet, nous disposons désormais de prévisions météorologiques et de modèles de fonctionnement hydrique du sol qui peuvent nous permettre de prédire l'évolution de la teneur en eau dans le sol (par exemple le modèle CHN). Cela permettrait aux agriculteurs et aux forestiers de bien organiser leur calendrier cultural.

Cette étude se porte certes sur les impacts des engins sur les sols agricoles mais il convient de souligner que le tassement ne concerne pas que le domaine agricole, c'est un sujet qui préoccupe tout autant les exploitations forestières et pour cause, les forêts ne sont pas exemptes des machines. En effet, l'utilisation des machines pour réaliser certaines opérations forestières peuvent causer de graves dommages, mettant ainsi en danger les services écosystémiques pendant de longues périodes.

Et le 3ème type de prévention, à savoir les « jours disponibles » obtenu à l'aide des outils de simulations, est celui qui est opté dans cette étude.

Le risque de tassement que pourrait occasionner le passage des machines agricoles dans un champ dans de mauvaises conditions montre combien il est important de bien agencer son calendrier cultural. Un bon agencement du calendrier en fonction des jours favorables ou disponibles dans une période pour réaliser les opérations culturales pourrait aider à limiter ou même éviter ce risque, qui peut affecter la fertilité des sols. C'est ce que nous allons développer dans le prochain chapitre.

⁴ Action d'ensemble, planifiée sur du long-terme et mobilisant un certain nombre d'opérations tactiques différentes. La stratégie permet d'appréhender avec anticipation le système de culture dans sa globalité.

⁵ Opérations ponctuelles à but limité et à déroulement rapide. Il s'agit ici des choix à réaliser pendant la campagne culturale, pour s'adapter à la saison en cours. La tactique fait donc partie de la stratégie tout en lui étant complémentaire.

Partie II

II. Le concept de « Jours Disponibles » et les modèles disponibles

L'un des principaux objectifs du projet J-Distas est d'arriver à prévenir le risque de tassement en grande culture. En ce sens, les partenaires du projet visent à mettre à disposition des agriculteurs un outil qui peut leur permettre de raisonner les dates pour réaliser les opérations culturales dans des conditions agronomiques favorables sans risque de tassement, permettant ainsi de limiter la dégradation de la structure des sols. Cet outil doit permettre une identification des jours dits « Disponibles » pour intervenir sur une parcelle, à l'aide de modèles de simulation capables de fournir des renseignements sur : l'humidité du sol et sa résistance au passage des engins, l'aptitude du sol à être travaillé (travaillabilité) et les conditions météorologiques (pluviométrie, température) de la parcelle ou du site visé pour réaliser une opération culturale, ce qui va influencer la praticabilité des sols, c'est-à-dire, la faisabilité du travail (traficabilité). Comme nous allons le développer dans les paragraphes suivants, la notion de jours disponibles permet de quantifier les besoins en main d'œuvre et en matériel d'une exploitation agricole dans son contexte pédoclimatique.

II.1. Présentation de la notion de jour disponible

II.1.1. Définitions

L'agriculteur fait face à deux types de contrainte pour réaliser une opération culturale : d'une part, l'opération doit être réalisée dans une période donnée, délimitée par d'autres interventions à réaliser ou par des stades phénologiques de la culture à respecter ; d'autre part, au sein de cette période, seule une petite quantité de jours sont « agronomiquement favorables » à la réalisation de cette opération culturale, en fonction des conditions climatiques (Reboul et Maamoun, 1983): on parle alors de Jours Disponibles. Un jour est « agronomiquement disponible » lorsque le sol peut supporter le passage des engins sans déformation de sa structure et que l'objectif de l'opération culturale visée est atteint (Müller et al., 2011 ; Obour et al., 2017). Un jour disponible serait donc la résultante de deux composantes : la traficabilité et la travaillabilité.

La traficabilité « est la capacité d'un sol à supporter le passage d'un engin agricole sans qu'il y ait de déformation importante et/ou irréversible de sa structure » (Ronsevell, 1993 ; Edwards et

al., 2016). Celle-ci dépend donc directement de la résistance mécanique du sol, fonction de sa structure, de sa texture et de son état hydrique (Schjønning et Lamandé, 2018).

La travaillabilité est « la possibilité de réaliser une opération culturale dans des conditions de réussite préalablement définies, et en limitant les dommages » (Edwards et al., 2016). Les variables qui influencent la réussite dépendent de l'opération considérée. On peut noter que pour les opérations de travail du sol, la variable principale est la teneur en eau du sol (en plus du type de sol), déterminant la qualité de la fragmentation du sol à l'issue de l'opération de travail du sol (Obour et al., 2017). Concernant la destruction mécanique d'un couvert végétal (culture intermédiaire, adventices, etc.), d'autres conditions, liées à l'efficacité de destruction et à l'absence de repousses, sont à considérer.

II.1.2. Pourquoi calculer les jours disponibles ?

Disposer d'une estimation quantitative des jours disponibles pour les opérations culturales permet d'organiser les chantiers à l'échelle d'une exploitation ou d'un bassin de production (Blocaille et al., 2016), d'anticiper les pointes de travail au sein de la campagne culturale, de dimensionner son parc matériel et/ou d'évaluer la faisabilité de nouvelles pratiques voire d'un nouveau système de culture (Reboul et Maamoun, 1983 ; Desoubry et al., 1996). L'existence de pointes de travail entre par ailleurs en compte dans l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture innovants avec, par exemple, le critère de « Surcharge de travail » dans le modèle MASC 2.0⁶ (Craheix et al., 2011). Ce critère de durabilité, estimé par expertise locale, pourrait être déterminé plus précisément en ayant une estimation quantitative des jours disponibles. En particulier, l'adoption de pratiques alternatives aux herbicides nécessite d'évaluer, d'un point de vue social, la durabilité des systèmes de culture mobilisant ces pratiques (Valantin-Morison et al., 2008).

Des résultats d'enquêtes auprès d'agriculteurs indiquent que leurs changements de pratiques sur cette thématique se font graduellement, en réalisant des essais (en général pendant un an) sur une pratique avant de l'adopter (Cerf et al., 2010). L'utilisation de modèles de type « jours disponibles » sur ces opérations permettrait d'évaluer la robustesse de ces changements de pratiques, en déterminant les pics de travaux induits, mais aussi vis-à-vis du changement

⁶ MASC 2.0 est un modèle d'évaluation multicritère mis en œuvre avec le logiciel d'aide à la décision qualitatif (DEXi) qui permet de décomposer tout problème décisionnel complexe en sous-problèmes plus faciles à résoudre. Dans ce modèle, chaque préoccupation relative au développement durable est représentée par un critère d'évaluation renseigné par une valeur qualitative du type « faible », « moyen », « élevé ».

climatique ou dans le cadre d'un changement plus général de système de culture. Cela pourrait correspondre aux attentes des conseillers enquêtés lors de la même campagne (Cerf et al., 2010), qui recherchent des sources d'information pour du conseil stratégique. De plus, les conseillers enquêtés dans le cadre d'un inventaire sur les modèles estimant les jours disponibles, déplorent l'inexistence d'un outil générique, permettant des réflexions stratégiques à l'échelle du système de culture et/ou pour le dimensionnement du parc matériel (Ben Romdhane, 2016).

II.2. Méthodes d'évaluation des jours disponibles, outils et modèles existants

II.2.1. Type de modèles permettant d'estimer les jours disponibles

Plusieurs méthodes d'une complexité croissante peuvent être utilisées pour évaluer le nombre de jours disponibles pour une opération culturale :

- **Modèle statistique** : après plusieurs années d'observations pour les opérations culturales d'intérêt, un nombre de jours disponibles probable pour chaque opération est déterminé. Le modèle statistique créé est utilisable uniquement sur le (les) lieu(x) d'observation (et donc dans un contexte agropédoclimatique donné), et ne permet pas la prise en compte des évolutions des pratiques, du matériel, ou du climat.
- **Corrélation avec les données météorologiques** : en utilisant des observations similaires à celles utilisées dans le modèle statistique, des corrélations sont établies avec des données météorologiques afin de déterminer des règles de décision pour définir un jour comme disponible ou non. Les modèles basés sur les données météorologiques présentent des défauts, qui peuvent être réduits si le modèle est utilisé pour déterminer un nombre de jours disponibles sur une grande série climatique.
- **En complément des données météorologiques, un modèle de bilan hydrique peut être utilisé** : c'est une méthode qui nécessite plus de variables d'entrée, notamment sur les sols (texture, densité apparente, teneur en matière organique, caractère sain ou hydromorphe du sol, drainage, etc.), mais permet d'obtenir des résultats plus précis. En effet, la travaillabilité et la traficabilité du sol sont fortement dépendantes de la teneur en eau du sol (Müller et al., 2011 ; Obour et al., 2017).

II.2.2. Modèles et/ou outils existants

II.2.2.1. Outil J-DISPO d'ARVALIS Institut du végétal

J-Dispo est un outil d'aide à la décision conçu dans les années 1990 par l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF), devenu depuis ARVALIS Institut du végétal. Afin de calculer le nombre de jours disponibles, J-Dispo a été revu en 2016 et la version mise à jour utilise désormais le module de bilan hydrique d'un modèle de culture dynamique, CHN (Métais et al., 2018).

La démarche utilisée dans J-Dispo permet de simuler jour par jour l'évolution de l'humidité de la couche arable en tenant compte de deux niveaux (Figure 10) :

- Premier niveau : de la surface à 10 cm de profondeur.
- Second niveau : de 10 cm de profondeur jusqu'à la limite inférieure de la couche arable du sol.

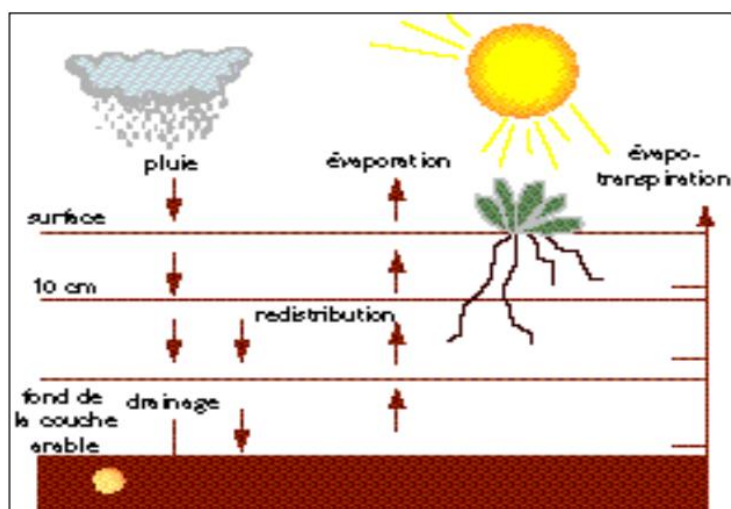


Figure 10 : Schéma présentant le fonctionnement du modèle J-Dispo (ARVALIS Institut du végétal, 1996).

Le sous-sol intervient dans le fonctionnement du modèle par son aptitude à drainer l'eau qui se trouve en excès dans la couche superficielle du sol (couche arable). Pour déterminer le nombre de jours disponibles, les humidités du sol calculées sont comparées à des seuils d'humidités établies expérimentalement ou à dire d'expert. Les niveaux d'humidité ainsi définis vont permettre d'identifier des catégories de jours qui peuvent être conseillés (les meilleures conditions pour réaliser l'opération visée), à risque (opération réalisable mais dans des conditions non optimales) ou déconseillés (opération impossible). Les paramètres et/ou variables utilisés en données d'entrée dans cet outil sont liés au sol, au couvert végétal et au

climat (Ben Romdhane, 2016). Les Jours Disponibles sont calculés en se basant sur des données climatiques passées, sans préciser le risque de tassement et la profondeur affectée.

Trois catégories de données d'entrées sont requises pour J-Dispo :

1. Données sur le sol

- Le taux d'argile qui détermine la capacité de rétention et de libération en eau du sol (capacité d'infiltration).
- Le taux de cailloux qui joue sur la quantité d'eau que le sol peut stocker.
- Le taux de matières organiques qui définit l'aération du sol et qui peut modifier la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol.
- La stabilité structurale qui est évaluée par l'intermédiaire d'un indice appelée « Indice de Battance » (IB). Ce paramètre donne des informations sur le degré de sensibilité d'un sol à la battance⁷. L'IB permet de calculer la vitesse à laquelle le sol va se refermer après le passage d'une machine.
- Le coefficient de drainage qui permet de déterminer la vitesse d'infiltration de l'eau entre les différents horizons du sol.
- La profondeur d'enracinement des plantes.

2. Données sur le climat

Les paramètres climatiques peuvent conditionner la dynamique du bilan hydrique dans le sol.

Les paramètres pris en compte dans le modèle J-DISPO sont :

- La pluviométrie,
- L'Evapotranspiration Potentielle (ETP),
- Tes températures minimale et maximale.

3. Données sur les plantes

- Les successions culturales.

⁷ Destruction des agrégats à la surface de certains sols sous l'impact des gouttes de pluie (ou de certains dispositifs d'irrigation), conduisant à la formation d'une mince croûte (0,5 à 5 mm) à structure litée, plus ou moins continue. Cette croûte de battance fait obstacle à l'infiltration de l'eau dans le sol. Il en résulte la formation de flaques d'eau et, souvent, du ruissellement, stade initial de l'érosion (Denis, 2004).

- Le cycle cultural.
- Les opérations culturales à réaliser.

Les règles utilisées dans le modèle J-Dispo (Gillet, 1992 ; Bessard duparc et al., 2017) pour estimer si un jour est disponible ne prennent pas en compte la contrainte appliquée au sol et le tassement profond : le nombre de jours disponibles calculé sera le même, qu'on utilise une machine légère ou très lourde.

J-Dispo s'appuie donc sur un bilan hydrique et un calcul fréquentiel pour évaluer le nombre de jours disponibles en fonction des données climatiques passées, et il prend en compte la traficabilité et la travaillabilité du sol. Cependant, il ne donne pas d'information précise sur le risque de tassement, ni sa profondeur.

II.2.2.2. Outil Perfbet

Perfbet est un Outil d'Aide à la Décision (OAD) qui vise à améliorer la performance des opérations de récoltes. Plus particulièrement, il est destiné aux utilisateurs des machines de récoltes de betteraves et aux techniciens et conseillers du monde des agroéquipements de la betterave. Il a été créé dans le cadre d'un projet financé par le CASDAR⁸ par un partenariat entre différents organismes qui sont spécialisés dans la betterave ou les agroéquipements : l'ITB, l'INRAE la FNCUMA et la FNEDT. C'est un outil interactif et gratuit, utilisable sur le WEB⁹ (ITB, 2014), qui s'articule en trois modules :

- Module technique, concernant les caractéristiques techniques des chantiers de récolte en termes de « choix des machines ».
- Module économie, permettant le calcul des coûts des chantiers de récolte.
- Module d'organisation du travail pour fixer la « faisabilité d'un plan de charge » (jours favorables).

Les modules peuvent être utilisés de façon indépendante avec des données pré-remplies. Dans le cadre de ce travail, le dernier module est celui qui nous intéresse le plus car il permet d'évaluer les jours favorables à la récolte de betterave, ces jours étant en nombre limité au cours d'une saison culturale. Il a pour objectif d'optimiser un plan de charge en fonction des risques climatiques de la région, du type de chantier de récolte et du type de sol. Ainsi, la simulation

⁸ Le Compte d'Affectation Spécial « Développement agricole et rural » (CASDAR).

⁹ <http://perfbet.itbfr.org/>

va permettre d'évaluer les répercussions en termes de tare terre¹⁰, de temps de travail et de consommation de carburant. Dans ce module, l'outil ne prend en compte qu'un seul type de machine à la fois.

Les données d'entrées pour réaliser les calculs de jours favorables sont les suivantes (Figure 11) :

- Le type de chantiers : 8 types sont disponibles en fonction des outils :
 - Arracheuse chargeuse.
 - Automotrice.
 - Intégrale avec 3 essieux.
 - Intégrale avec 2 essieux d'environ 12 tonnes.
 - Grande intégrale avec 2 essieux d'environ 18 tonnes.
 - Chantier décomposé avec chargeuse.
 - Chantier décomposé avec débardeuse.
 - Chantier décomposé avec auto-chargeuse tractée.
- Les données météorologiques : une quinzaine de stations est disponible dans des zones de culture de la betterave en France (exemple : Lille, Colmar, Rouen, Orléans, etc.).
- Le type de sol : des sols limoneux, limono-argileux, sablo-limoneux, argilo-calcaire et craie sont au choix.
- Le plan de charge : il faut renseigner le nombre d'hectare total à récolter.
- La performance d'arrachage de la betterave en hectare/heure.
- Le nombre d'heures par jour.

Une répartition des hectares à récolter est faite à partir du plan de charge, sur plusieurs périodes de 15 jours pour la campagne de début septembre à décembre (1-15 septembre, 16-30 septembre etc. jusqu'au 15 décembre).

¹⁰ Tare terre c'est l'ensemble des matières étrangères qui entourent la betterave une fois arrachée. Elle se constitue principalement de terre, de mottes de terre, de cailloux, de feuilles, de mauvaises herbes ou de bois (Le Parisien).

Type de chantier

Plan de charge (ha)

Performance ha/h

Nb d'h de travail par jour

Stations Météo

Type de sol

Part arrachage en ha

(Rentrez vos propres valeurs ou utilisez celles par défaut, attention la somme des ha des différentes quinzaines doit être égale à votre plan de charge)

1-15 Septembre	
16-30 Septembre	
1-15 Octobre	
16-30 Octobre	
1-15 Novembre	
16-30 Novembre	
Décembre	

Figure 11 : Les données d'entrées de Perfbet (ITB, 2014).

Ce module propose plusieurs types de sorties, mais celle qui concerne le nombre de jour disponible est la **répartition du nombre de jours** où les conditions de récoltes peuvent être jugés « faciles », « difficiles » ou « trop humides » sur les périodes de 15 jours (Figure 12). Cette catégorisation des conditions de récolte se base sur le fait qu'il faut arrêter l'arrachage des betteraves les jours et lendemains de pluie, en attendant un niveau suffisant de ressuyage des sols. L'état de la réserve utile en eau (RU)¹¹ des 10 premiers centimètres de profondeur de sol, obtenu à partir des données climatiques de la zone et du type de sol, permet de définir trois catégories de jours. Les jours considérés comme « faciles » ont une RU inférieure à 90 %, les jours considérés comme « difficiles » sont ceux pour lesquels la RU est située entre 90 % et 100 %, et les jours « trop humides » sont ceux où le sol est à la capacité au champ, autrement dit, ce sont les jours où le sol atteint son niveau en eau maximal. (ITB, 2014).

¹¹ La Réserve Utiles ou RU est la quantité d'eau présente dans le sol et utilisable par les plantes, et classiquement définie comme la différence entre l'humidité à la capacité de rétention et l'humidité au point de flétrissement. Lorsque la RU est épuisée, on est au point de flétrissement permanent. Et inversement, le sol est à la capacité au champ, qui correspond à la teneur en eau maximale d'un horizon (Denis, 2004).

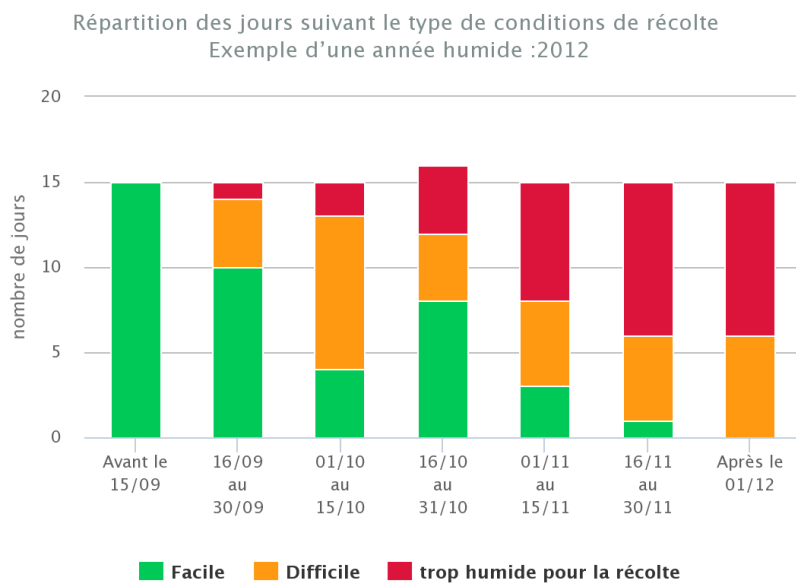


Figure 12 : Exemple de sortie de la répartition du nombre de jours disponibles pour réaliser une récolte (Perfbet¹²).

II.2.2.3. Outil Simeq

Le logiciel Simeq a été développé par Arvalis dans les années 1990. Le modèle qui y est utilisé permet d'évaluer l'adéquation entre d'une part, les ressources dont dispose l'exploitation agricole en termes de main-d'œuvre et de matériel, et d'autre part, les besoins à couvrir dans cette exploitation en termes d'itinéraires techniques à réaliser pour chacune des espèces cultivées. L'outil permet de calculer les jours agronomiquement disponibles pour réaliser une opération agricole sur une série climatique de 20 ans. A priori, l'outil permet de réaliser une étude de faisabilité des opérations culturales sur le plan agronomique et économique (Retaureau et Noël, 2011).

Simeq considère qu'il existe un bon équilibre entre matériel et surface lorsque les deux conditions suivantes sont réunies :

- ✓ Si les principaux travaux à réaliser (semis, récolte, etc.) se terminent normalement en temps et en heure et ne subissent en aucun cas des retards dus au climat (un an sur quatre au maximum).
- ✓ Si l'organisation des travaux à réaliser propose aux personnes des conditions acceptables en termes de durée de travail.

¹² <http://perfbet.itbfr.org/planCharge>

La durée quotidienne de traction, qui varie de 5 à 12 heures dans les simulations, est fixée en fonction de la disponibilité de chaque personne. Le nombre de jour travaillé par semaine peut lui aussi varier selon les disponibilités réelles et pourrait monter à 7 jours pour certaines opérations. Compte tenu du fait qu'il n'y a pas que des heures passées sur le tracteur (temps d'entretien, de réparation, de suivi des cultures...), le logiciel estime qu'un actif ne peut pas réaliser plus de 800 heures de traction par an (Retaureau et Noël, 2011).

Simeq utilise des données très précises pour calculer le nombre de jours disponibles, les risques climatiques et autres. Pour cela, l'outil utilise des données d'entrée sur :

- Les exploitations agricoles à savoir la main-d'œuvre, les matériels agricoles utilisés, les rotations et le type de sol.
- L'organisation des travaux c'est-à-dire les opérations culturales, les itinéraires techniques et le calendrier prévisionnel.
- La météo régionale (donnée climatique).

Simeq permet de tester et de comparer différents systèmes agricoles en termes de calendrier de travail et de charges de mécanisation en utilisant une approche par scénarios. Avec cette approche, il est possible d'estimer la surface maximale de sol qui pourrait être cultivée pour chaque système testé pour en définir la limite de faisabilité. Il permet également d'évaluer le risque climatique encouru, les jours disponibles pour réaliser les opérations, le temps de travail et d'autres paramètres économiques comme les charges de mécanisation, le coût d'une implantation, etc. (Figure 13).

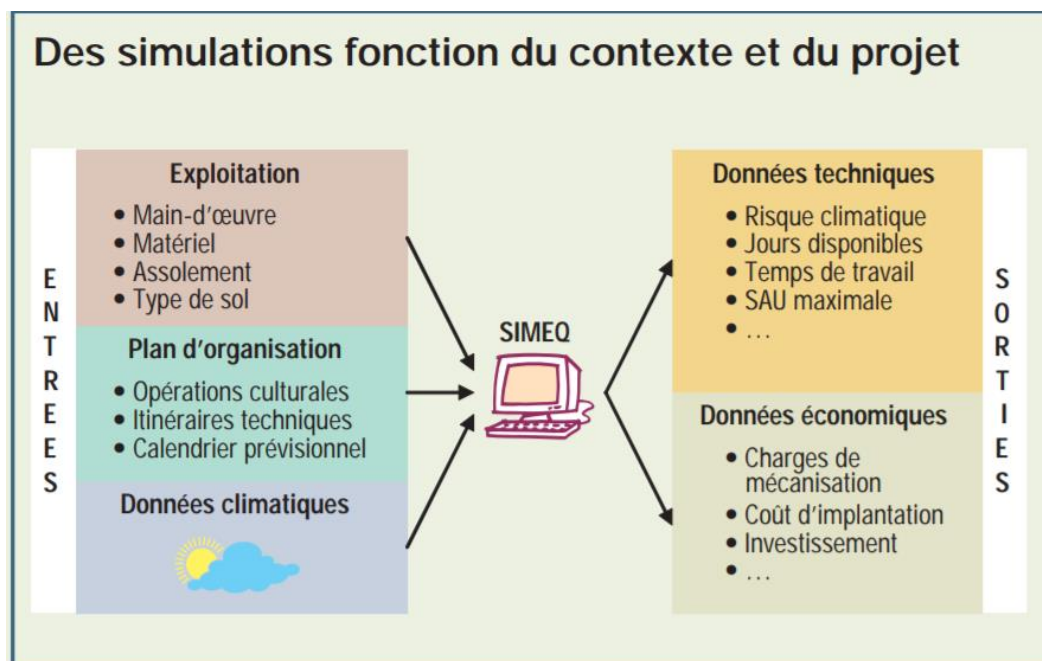


Figure 13 : Données d'entrée et de sorties du logiciel Simeq (Retaureau et Noël, 2011).

II.2.2.4. Le modèle de culture CHN

Les modèles de culture (dont CHN) permettent aujourd'hui d'être de plus en plus précis dans l'estimation de l'état hydrique du sol, et peuvent être utilisés pour calculer des jours disponibles (Bessard Duparc et al., 2017).

Le modèle CHN a été développé par Arvalis, et son but premier est d'être utilisé pendant la saison agricole comme outil d'aide à la décision. Il permet de modéliser des flux de carbone (C), d'eau (H₂O) et d'azote (N) au sein des systèmes de culture. C'est un modèle de culture très complexe qui prend en compte tout le système sol-plante-atmosphère. Il est cependant différent des autres modèles de culture existants, qui sont plutôt dédiés à la recherche (leur utilisation dans l'aide à la décision reste difficile), car n'importe quel agriculteur ou conseiller agricole peut le paramétrer. CHN rassemble de multiples connaissances agronomiques tels que la phénologie, l'écophysologie, la pédologie, la météorologie et également la génétique (Bessard Duparc et al., 2017). Le modèle est intégré dans le système d'information d'Arvalis plus précisément dans l'outil Panoramix, ce qui lui permet d'accéder aux bases de données d'Arvalis sur les sols, les cultures et la météo. Il utilise des modèles historiques d'Arvalis, comme ceux des stades des plantes, pour faire des simulations jusqu'à la récolte, et repose sur un calcul fréquentiel

automatisé¹³. Il peut être utilisé avec les logiciels Excel et R. Le modèle de culture CHN a pour l'instant été mis en œuvre sur le blé tendre, le blé dur et le maïs (Laberdesque et al., 2017).

Le modèle CHN est composé de 3 compartiments (Figure 14) : sol, plante et atmosphère.

Le **compartiment sol** est connecté à la base de données sols d'Arvalis, laquelle contient différents types de sol par région administrative (plus de 400 sols). Il utilise des fonctions de pédotransfert, i.e. des modèles qui permet de traduire les données de sols disponibles en données nécessaires au paramétrage de CHN, comme la densité apparente ou la réserve utile. Tous les sols enregistrés sont identifiés par leur teneur en calcaire, leur pierrosité, leur granulométrie (texture), leur profondeur et leur hydromorphie (Soenen et al., 2015 ; Bessard Duparc et al., 2017 ; Laberdesque et al., 2017).

Le **compartiment atmosphère** est relié à la base de données météorologique d'Arvalis qui contient des données météo journalières à travers toute la France. Cette base de données est connectée à plus de 700 stations et regroupe un historique de données de plus de 25 ans (Laberdesque et al., 2017). Des données sur la température, le rayonnement solaire, les précipitations et l'évapotranspiration sont utilisées comme données d'entrée.

Le **compartiment plante** est relié à la base de données des variétés d'Arvalis, qui regroupe plus de 400 variétés de maïs, 350 variétés de blé tendre et 50 variétés de blé dur. Cette base de données variétale est mise à jour chaque année, avec l'insertion des dernières variétés (Laberdesque et al., 2017). Les données d'entrée sont : le précédent cultural, la culture intermédiaire, les variétés, la date et la densité de semis, la fertilisation (azote minéral et résidus organiques), l'irrigation et le travail du sol.

Les données de ces trois compartiments vont permettre de calculer des flux de carbone, d'eau et d'azote ainsi que des stocks d'eau et d'azote par tranche d'un centimètre de sol (Figure 14). Les flux d'eau (ou bilan hydrique), calculés en séparant l'évaporation de la plante de la transpiration du sol, vont permettre de déterminer les taux d'humidité de chaque couche, puis les jours où les opérations culturales peuvent être réalisées dans de bonnes conditions d'efficacité (travaillabilité) (Bessard Duparc et al., 2017).

¹³ Le calcul fréquentiel pour les simulations jusqu'à la récolte se base sur les données climatiques des 20 dernières années, desquelles on retient la médiane ou un autre décile au choix.

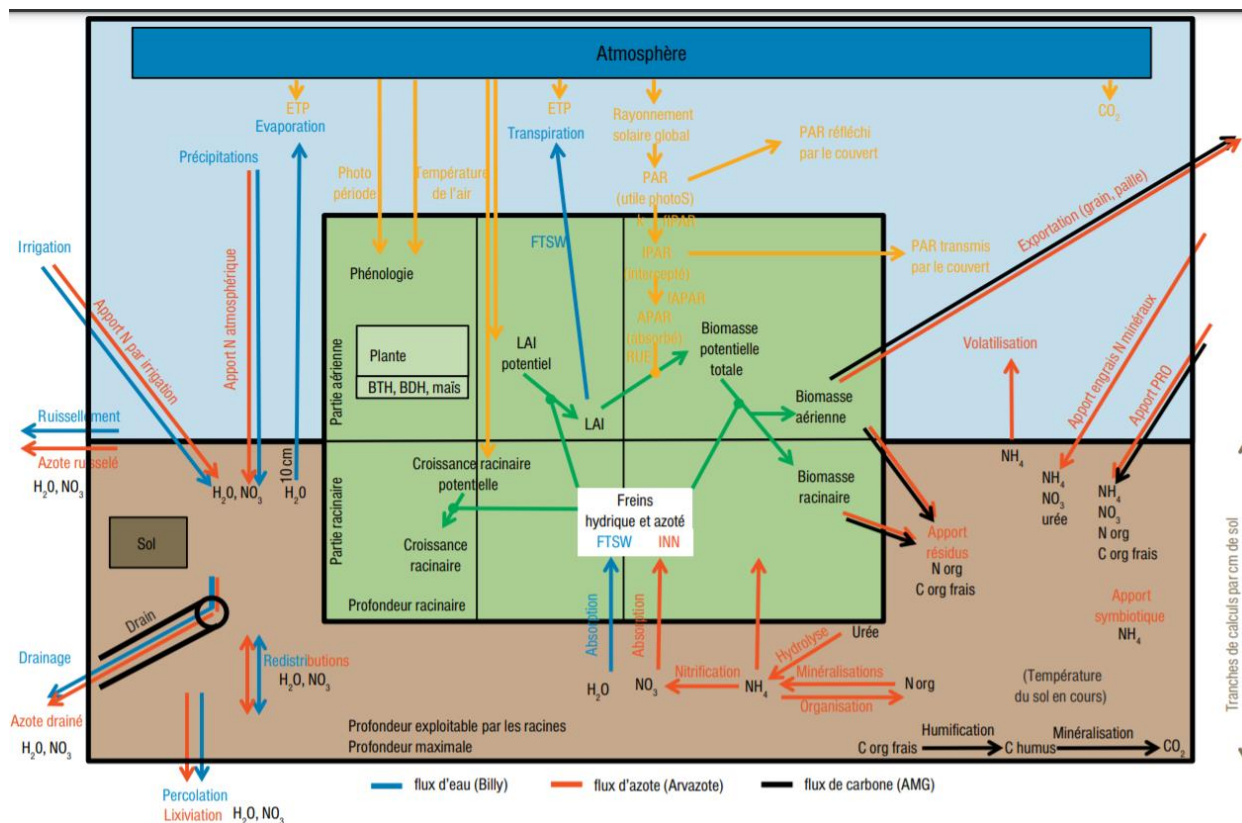


Figure 14 : Les compartiments du modèle CHN et les flux (Laberdesque et al., 2017).

Pour décider si un jour est disponible, l'estimation de l'état hydrique du sol n'est pas suffisante, mais cela devient possible lorsque CHN est couplé avec d'autres modèles ou règles de décisions. Différentes règles permettant de déterminer si un jour est disponible font appel non seulement à l'état hydrique du sol, mais aussi à la contrainte appliquée sur le sol à 50 cm de profondeur : elles nécessitent donc le recours à un modèle de propagation des contraintes dans le sol (Edwards et al., 2016).

II.2.2.5. Outil Terranimo®

Terranimo® (Stettler et al., 2010) est un outil d'aide à la décision permettant d'évaluer le risque de tassement des sols. Pour cela, il intègre des connaissances sur la distribution de la contrainte à l'interface entre le pneu et le sol (Schjønning et al., 2015), sur la propagation de ces contraintes dans le sol (Keller et al., 2014) et sur la résistance mécanique des sols (Schjønning et Lamandé, 2018). C'est la confrontation des contraintes et de la résistance du sol qui déterminent le risque de tassement. Terranimo® est le fruit d'une collaboration internationale (Lassent et al., 2013), initialement développée au Danemark (entre 2009 et 2012), et est maintenant disponible dans une version internationale et sept versions nationales : Danemark, Norvège, Finlande, Pays-Bas, Belgique-Flandre, Royaume-Uni et France. La version française n'est cependant qu'une

traduction française de la version internationale, sans connexion avec des bases de données françaises. Cet outil ne renseigne pas la travaillabilité du sol et la version internationale en ligne ne dispose pas de modèle hydrique nécessaire pour du calcul fréquentiel (calcul sur de longues séries climatiques pour évaluer une fréquence de risque). Les différentes versions de Terranimo® sont accessibles en ligne (<https://www.terranimodk/>).

Le principe de Terranimo® est simple : la contrainte (stress) exercée sur le sol par les engins agricoles est comparée à la capacité du sol à résister au tassement (résistance du sol). Si la contrainte exercée est supérieure à la résistance du sol, il y a un risque de tassement et il faut donc éviter de réaliser les opérations culturales envisagées. Dans le cas contraire, aucune déformation n'est imminente, l'opération pourra se réaliser sans risque potentiel de tassement.

Les données d'entrées utilisées sont les suivantes :

- La marque et le modèle de la machine.
- Le poids total, la puissance de la machine.
- Le poids par essieu et par roue.
- La marque, le modèle et la pression de gonflage des pneus.
- Le type de sol (granulométrie), la teneur en matière organique, la densité apparente du sol.
- L'humidité du sol (potentiel hydrique).
- La profondeur du sol (par couche de 10 cm jusqu'à 150 cm).

Pour estimer la résistance du sol au tassement, cet outil mobilise d'abord des bases de données machines et de sol mais l'humidité du sol est obtenue à partir d'autres modèles (comme CHN). La contrainte que pourrait exercer la machine sur le sol est ensuite déterminée à partir des résultats obtenus. Enfin, des règles de décisions sont appliquées par couche de sol (Figure 15) pour affirmer s'il y a un risque de tassement ou pas.

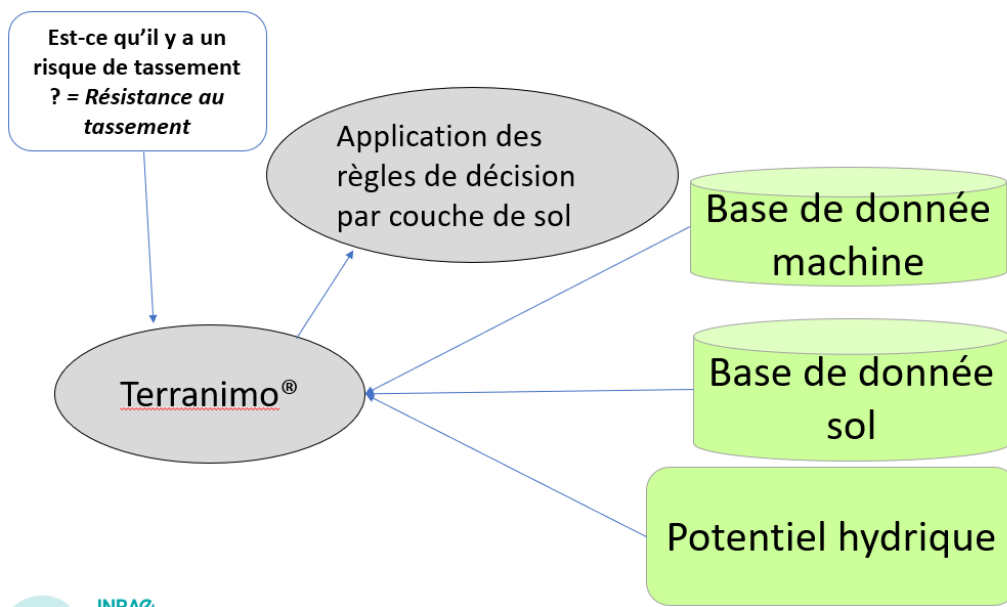


Figure 15 : Fonctionnement du modèle Terranimo®.

Après avoir obtenu la contrainte exercée sur le sol (stress) et la résistance du sol, une règle de décision est appliquée à partir d'un diagramme tricolore, dans le but de définir le niveau de danger pour le sol. Les couleurs sont les suivantes (Figure 16) :

- Vert : aucun risque de tassement.
- Jaune : zone de transition critique avec un risque considérable de tassement.
- Rose : risques sévères de tassement inévitables. Cela voudrait dire qu'il faut éviter de circuler sur le sol sauf si des mesures immédiates sont prises pour diminuer le risque de tassement (exemple : réduction du poids de la machine, poids sur les roues ou la pression de gonflage des roues).

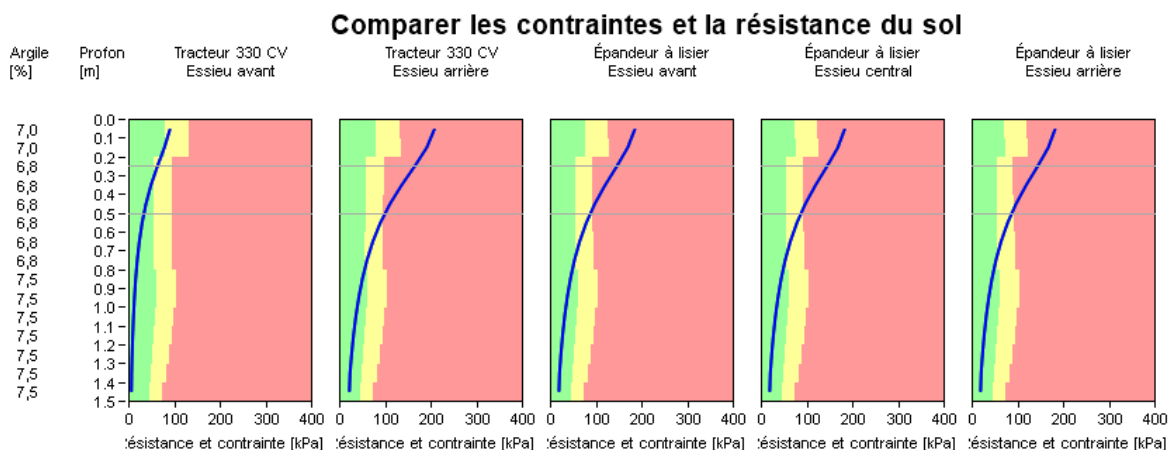


Figure 16 : Résultats de sortie de Terranimo®, comparant les contraintes des roues avec la résistance du sol.

Les lignes bleus doivent rester dans le vert pour éviter tout tassement, et dans le jaune pour éviter un tassement sévère.

Terranimo® permet donc de prévoir les risques de tassement liés à la circulation des engins dans un champ agricole, mais ne permet pas d'évaluer si les conditions sont adaptées pour un travail du sol, et ne dispose pas de modèle hydrique. Les simulations sont faites pour une situation précise mais ne prennent pas en compte l'évolution dans le temps de l'état hydrique du sol. Par contre, il peut aider dans l'optimisation des choix des machines agricoles et dans la prévention des dommages sur la structure des sols en indiquant les conditions pour lesquelles il y a un risque de tassement.

II.2.3. Outil J-Distas

Plusieurs outils existent pour calculer soit le risque de tassement, soit le nombre de Jours disponibles (efficacité des opérations), mais jusqu'à aujourd'hui, aucun outil ne permet de combiner les deux approches.

L'outil J-Distas est donc un outil informatique qui permet de déterminer les jours agronomiquement disponibles, c'est-à-dire les jours où le sol peut supporter le passage des machines agricoles sans déformation de sa structure et pour une bonne efficacité de l'opération culturale visée, en combinant les autres outils existants et en les faisant évoluer si nécessaire. Cet outil est inspiré de l'outil J-Dispo.

Toutes les données d'entrée utilisée par l'outil J-Distas sont présentées dans la Figure 17. Pour déterminer les Jours Disponibles, l'outil J-Distas intègre des informations (i) sur l'humidité du sol grâce à l'utilisation de CHN, (ii) sur le risque de tassement des sols (surtout en profondeur) provenant de l'outil Terranimo® et (iii) sur les conditions d'efficacité des opérations culturales provenant de règles de décision expertes basées sur les résultats de CHN et de Terranimo® (Figure 17). J- Distas regroupe donc les deux critères qui vont permettre de déterminer les nombres de Jours Disponibles réels.

Les niveaux d'aptitude atteints pour les critères inclus dans la notion de Jours Disponibles (tassement, traficabilité, travaillabilité, efficacité) sont calculés en s'appuyant sur des données communes relatives au sol et à son état hydrique, aux conditions climatiques, et au matériel employé (un module tassement et un module travaillabilité fonctionnant en parallèle) (Figure 17). L'outil J- Distas s'appuie donc sur un enchaînement de calculs pour définir un nombre de jour disponibles :

- 1) Calcul des propriétés hydriques des sols via le modèle CHN (humidité du sol, humidité à la capacité au champs, potentiel hydrique).
- 2) Calcul des risques de tassement avec Terranimo®, en utilisant les résultats de CHN comme données d'entrée (potentiel hydrique uniquement). Terranimo® permet d'estimer la résistance du sol et la contrainte imposée par les engins agricoles.
- 3) Comparaison de la résistance du sol et la contrainte imposée par les engins agricoles afin d'évaluer la traficabilité du sol en trois classes (Lacoste et Métails, 2021) :
 - a. Faible : contrainte appliquée au sol $< 0.75 \times$ résistance du sol
 - b. Moyen : $0.75 \times$ résistance du sol $<$ contrainte appliquée au sol $< 1.25 \times$ résistance du sol
 - c. Fort : contrainte appliquée au sol $> 1.25 \times$ résistance du sol
- 4) Estimation de la travaillabilité à partir des résultats de CHN (humidité du sol et humidité à la capacité au champs) et de règles de décision expertes, pour déterminer si un sol est plastique, semi-plastique, friable, dur ou très dur.
- 5) Application d'un schéma d'interprétation (ensemble de règles de décision) permettant de déclarer si le jour est disponible au vu des niveaux d'aptitude atteints sur chaque critère (Annexe 7).

J-Distas est un prototype rassemblant des outils et des données interopérables pour l'aide à la décision stratégique. Il est encore en cours de développement. Sa version actuelle combine un ensemble de scripts exécutables avec le logiciel R (R Core Team, 2021). L'utilisation de CHN et de Terranimo® est également réalisée via R, par le biais d'une API, c'est-à-dire une interface de programmation d'application qui, à l'aide d'un codage, les interroge sur un webservice.

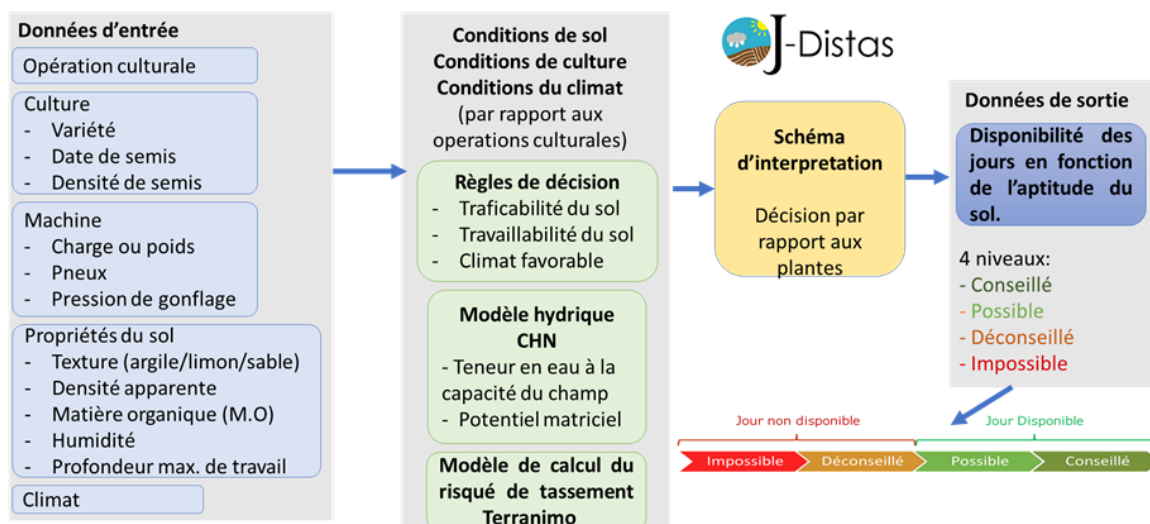


Figure 17 : Fonctionnement schématique de l'outil J-Distas.

Tout outil et/ou modèle de simulation ou de prédiction doit subir des processus d'évaluations avant d'être validé pour être opérationnel. Parmi ces évaluations, l'analyse de sensibilité fait partie des plus importantes, car elle pourrait permettre d'identifier l'influences des différentes données d'entrée sur la sortie du modèle et/ou outil. Le prochain chapitre va traiter cette méthode d'évaluation.

Partie III

III. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité constitue une démarche puissante pour décrire l'incertitude dans les sorties d'un modèle et hiérarchiser l'importance des différents facteurs incertains. L'objectif de ce chapitre est de présenter les principes de base de l'analyse de sensibilité, les sources des incertitudes dans un modèle et les méthodes d'analyse de sensibilité, en particulier l'approche de criblage de Morris qui a été utilisée dans cette étude.

III.1. Généralités et principes de base de l'analyse de sensibilité

Ce qui rend la modélisation et la recherche scientifique généralement si complexes, ce sont les incertitudes. Les modélisateurs et les scientifiques ont longuement débattu sur la question de l'indétermination des modèles. La plupart des modélisateurs d'aujourd'hui seraient probablement d'accord sur le fait qu'un modèle ne peut pas être validé, dans le sens de « prouver qu'il est totalement réaliste ». Il est plutôt défendable et correct de dire qu'un modèle a été largement vérifié, ce qui signifie que le modèle a survécu à une série de tests, dont l'analyse de sensibilité (Figure 18), afin d'accepter sa capacité à expliquer ou à prédire une situation de manière convaincante et parcimonieuse (Saltelli et al., 2008).

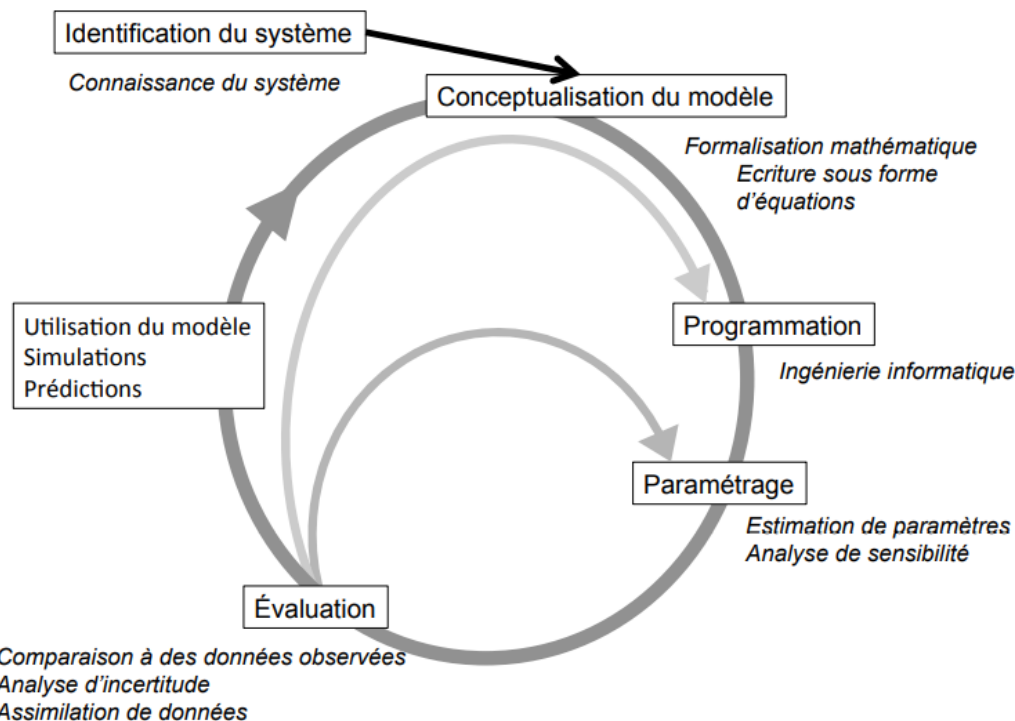


Figure 18 : Etape de validation d'un modèle (Toulet, 2012).

Lors de l'élaboration et de l'utilisation de modèles de simulation numérique, les méthodes d'analyse de sensibilité sont des outils précieux. L'analyse de sensibilité est utilisée dans divers domaines et différents contextes. En général, elle est perçue comme une évaluation qui permet de mesurer l'influence ou l'importance des variables et/ou paramètres d'entrée d'un modèle sur la sortie d'un modèle ; autrement dit, elle permet de déterminer la contribution des différentes sources d'incertitudes du modèle dans l'incertitude des sorties (Saltelli et al., 2004). De ce fait, elle peut être utilisée pour hiérarchiser les facteurs d'entrée, de manière à déterminer les variables d'entrée contribuant le plus à un comportement de sortie, ainsi que les entrées non influentes, et à identifier les effets d'interaction entre variables d'entrée dans le modèle (Figure 19). Pour cela, il faut mesurer la réaction de la sortie du modèle face aux variations des variables d'entrées ou des paramètres du modèle. Cette variabilité peut être attribuée au manque de précision dans l'estimation de ces variables d'entrée. L'analyse de sensibilité peut aussi aider le modélisateur à comprendre le modèle utilisé, à vérifier le modèle et identifier d'éventuelles erreurs techniques. Elle permet ainsi d'établir des priorités, de définir les entrées et paramètres nécessitant des estimations plus précises, de simplifier les modèles et les processus et d'éviter des erreurs d'analyse. Elle constitue donc une aide à la validation d'un code informatique, et peut permettre d'orienter les efforts de recherche.

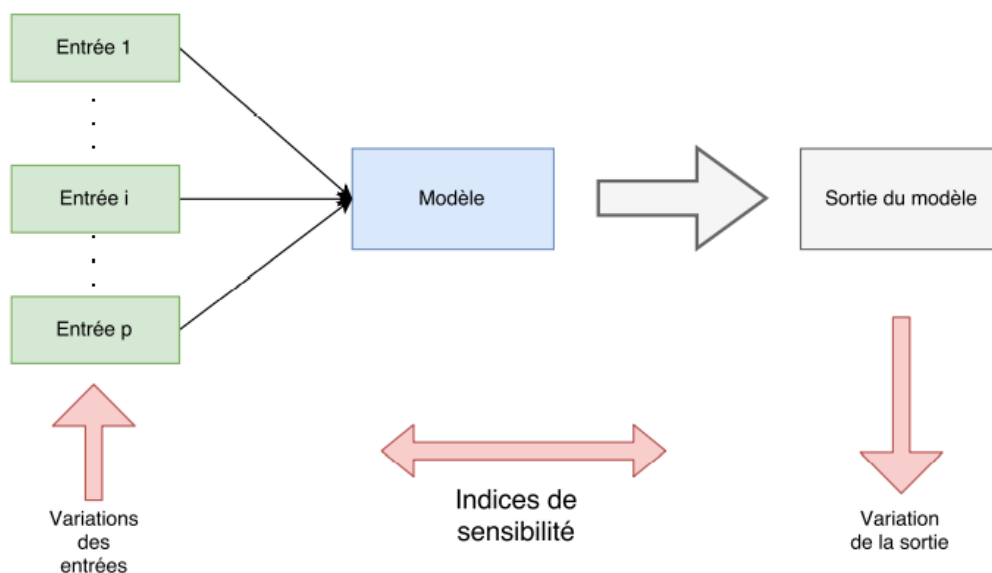


Figure 19 : Description du principe général de l'analyse de sensibilité.

Les objectifs de l'analyse de sensibilité sont donc nombreux. Le développement des outils de calcul et de simulations numériques a permis le développement de plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité (Saltelli et al., 2000 ; Saltelli et al., 2008), permettant de répondre à ces différents objectifs. Saltelli et al. (2004), ainsi que Pappenberger et al. (2010), ont insisté sur la nécessité

de spécifier clairement les objectifs d'une étude avant de procéder à une analyse de sensibilité pour choisir la méthode adaptée. Ces objectifs peuvent inclure :

- L'identification des entrées non influentes afin de les fixer à des valeurs nominales.
- La cartographie des comportements de la sortie en fonction des entrées, en se concentrant sur un domaine spécifique d'entrées si nécessaire.
- Le calibrage de certaines entrées du modèle en utilisant des informations disponibles (production réelle, observations, contraintes, etc.).

Une pratique connexe à l'analyse de sensibilité est « l'analyse d'incertitude », qui se concentre plutôt sur la quantification de l'incertitude dans le modèle. Idéalement, les analyses d'incertitude et de sensibilité devraient être effectuées en tandem, car elles sont complémentaires (Saltelli et al., 2004). Dans cette étude, nous nous sommes cependant limités à l'analyse de sensibilité.

III.2. Sources d'incertitude dans un modèle

Les modèles de simulations agronomiques, biologiques et écologiques sont souvent utilisés comme des outils d'aide à la décision. Ils font cependant parfois l'objet d'erreurs de prédictions majeures conduisant ainsi à des décisions erronées. Selon Faivre et al. (2013), il existe un très grand nombre de modèles, mais ils sont tous composés de quatre éléments (Figure 20) :

- **Les variables d'entrée (x).** Elles correspondent à des variables mesurées ou renseignées par les utilisateurs du modèle. Elles décrivent les caractéristiques du système modélisé, par exemple les caractéristiques du sol d'une parcelle de maïs, le climat et les pratiques agricoles appliquées sur cette parcelle.
- **Les paramètres (θ).** Ce sont des éléments non mesurés ou non renseignés par l'utilisateur, mais essentiels au fonctionnement du modèle. Dans un modèle agronomique, un paramètre peut correspondre, par exemple, à la perte de rendement maximal induite par un tassement en grande culture. Les paramètres doivent être estimés avant de pouvoir utiliser le modèle, à partir de données expérimentales, ou par expertise ou par d'autres moyens.
- **Les équations (f).** Elles relient les variables d'entrée et les paramètres aux variables de sortie du modèle.

- **Les variables de sortie (y).** Ce sont les variables simulées par le modèle, le nombre de jours disponibles dans le cas de l'outil J-Distas.

Les erreurs de prédictions des modèles peuvent provenir d'incertitudes sur les valeurs des variables d'entrée, sur les valeurs des paramètres et sur les équations du modèle (Faivre et al., 2013). La question qui se pose alors est de savoir quelle méthode devrait être choisie pour effectuer une analyse de sensibilité pour l'un ou l'ensemble des éléments ci-dessus.

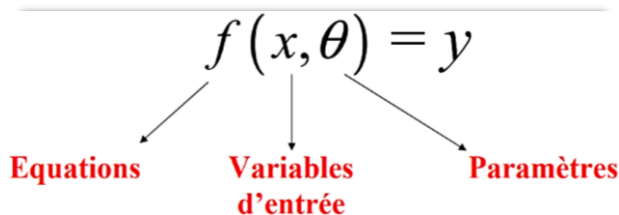


Figure 20 : Sources d'incertitude dans un modèle.

III.3. Déroulement d'une analyse de sensibilité

Pour réaliser une analyse de sensibilité, il faut définir l'objectif de l'analyse puis choisir les variables d'entrée dont on souhaiterait étudier l'influence. Quelle que soit la méthode choisie pour conduire une analyse de sensibilité, les étapes clés à suivre sont alors les mêmes :

- **Etape 1 : définition des distributions pour les facteurs incertains**

Pour réaliser une analyse de sensibilité, il faut impérativement définir des distributions ou gammes de valeurs probables pour les facteurs (paramètres et/ou variables) dont on veut étudier l'influence. Les gammes de valeurs probables des facteurs incertains peuvent être définies à partir de la littérature scientifique, d'informations fournies par des experts du domaine ou des valeurs des variables estimées dans des mesures expérimentales. Il est également important de prendre en compte les éventuelles corrélations ou dépendances entre facteurs incertains. Dans la pratique, les facteurs sont souvent supposés indépendants, mais lorsque l'hypothèse d'indépendance est exclue et lorsque des informations sur leurs corrélations sont disponibles, il est important de prendre en compte ces corrélations dans les gammes de valeurs des facteurs incertains.

- **Etape 2 : échantillonnage**

Le but de cette étape est de tirer de façon aléatoire et/ou par simulation numérique des valeurs des facteurs incertains (paramètres et/ou variables) x_1, \dots, x_k dans les distributions définies à

la première étape. Le résultat va se présenter sous la forme de N (nombre) séries de x_{1N}, \dots, x_{kN} (série 1 : x_{11}, \dots, x_{k1} , série 2 : $x_{12}, \dots, x_{k2}, \dots$, série N : x_{1N}, \dots, x_{kN}). Différentes méthodes d'échantillonnage peuvent être utilisées : échantillonnage aléatoire, échantillonnage en hypercube latin... Indépendamment de la méthode utilisée, des valeurs sont définies en choisissant des valeurs spécifiques dans les gammes de variation des facteurs incertains. Leur combinaison constitue un plan d'expérience de taille N .

- **Étape 3 : calcul de la sortie du modèle**

Cette étape permet de calculer les N valeurs des variables de sortie y d'un modèle qui correspond aux N séries de facteurs incertains générés à la deuxième étape. Ceci permet d'obtenir une série de N valeurs y définies par : $y_1 = f(x_{11}, \dots, x_{k1}), y_2 = f(x_{12}, \dots, x_{k2}), \dots, y_N = f(x_{1N}, \dots, x_{kN})$. Dans la pratique, cette étape consiste à utiliser le modèle avec les N séries de valeurs générées comme données d'entrée. La difficulté de cette étape dépend du niveau de complexité du modèle, un modèle complexe pouvant induire des temps de calcul longs pour obtenir les résultats des simulations. Un temps de calcul très long pourra rendre l'utilisation d'une valeur de N élevée difficile, voire même impossible.

- **Étape 4 : calcul des indices de sensibilité**

Un indice de sensibilité permet de mesurer l'influence d'un facteur incertain (variable d'entrée et/ou paramètre) sur la sortie d'un modèle. Quand celui-ci est élevé, cela signifie que le facteur influence fortement la sortie du modèle et dans le cas contraire, le facteur est réputé influencer faiblement la sortie du modèle. Des indices de sensibilité pour plusieurs facteurs incertains peuvent être calculés en vue de hiérarchiser l'effet de ces facteurs. Pour obtenir ces indices, les simulations sont réalisées (étape 3) pour faire varier les variables et/ou paramètres du modèle selon le plan de simulation défini (étape 2). Les résultats de ces simulations permettent de calculer les indices (Faivre et al., 2013).

Un indice de sensibilité peut être basé sur des dérivés du modèle (méthodes dites locales), ou sur une méthode de criblage simple ou basé sur une décomposition de la variance (méthodes dites globales). Les indices de sensibilité simples considèrent chaque facteur (variable d'entrée ou paramètre) de manière indépendante. Un exemple d'indice de sensibilité simple utilisé dans la littérature est celui de Bauer et Hamby (non décrit dans cette étude). Cet indice est très limité car l'influence de chaque facteur est mesurée séparément : la valeur de l'indice peut donc dépendre des valeurs de référence et les éventuelles interactions entre facteurs ne sont pas

considérées. En général, les modèles biologiques ou agronomiques sont complexes et nécessitent des variables d'entrées et des paramètres qui agissent de façon non indépendante. Dans ce cas, les indices de sensibilité simples ne seront pas suffisants et il sera nécessaire d'utiliser des indices plus sophistiqués. Ces indices seront décrits dans les sections suivantes.

III.4. Classification des méthodes de sensibilité

Comme indiqué précédemment, les techniques d'analyse de sensibilité peuvent être regroupées en deux catégories : les méthodes locales et les méthodes globales.

III.4.1. Méthodes d'analyse de sensibilités locales

Jusqu'à une date récente, l'analyse de sensibilité était conçue et souvent définie comme une mesure locale de l'effet d'une entrée sur une sortie. L'analyse de sensibilité locale a pour objectif d'étudier la variabilité de $y(x)$ (sortie d'un modèle) causée par une petite variation de x (variable d'entrée du modèle) autour d'une valeur x_0 , considérée comme référence. Autrement dit, elle mesure de façon quantitative l'influence d'une petite variation autour d'une valeur donnée. On l'obtient généralement en calculant, par une approche directe ou indirecte, les dérivées de $f(x)$ par rapport à x , qui sont considérés comme les indices de sensibilité (Rabitz, 1989 ; Turanyi, 1990). La plupart des analyses de sensibilité rencontrées dans la littérature sont d'ailleurs basées sur des dérivées, car la dérivée d'une sortie $y(x)$ par rapport à une entrée x_i peut être considérée comme une définition mathématique de la sensibilité de $y(x)$ par rapport à x_i (Saltelli et al., 2004) (Figure 21).

Variation de $y(x)$ « autour » x_0

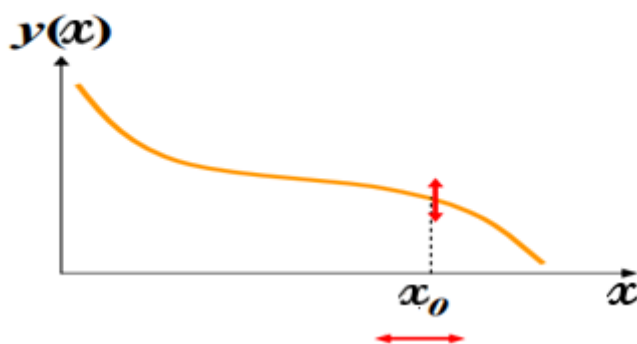


Figure 21 : Analyse de sensibilité locale (Faivre et al., 2013).

L'analyse de sensibilité locale est très utile pour étudier le fonctionnement d'un modèle autour de certaines valeurs de variables d'entrées et/ou de paramètres. En revanche, lorsque les

facteurs incertains varient sur une large gamme de valeurs, elle ne permet pas de les étudier facilement puisque cette méthode ne permet d'étudier que de petites variations pour chacune des entrées du modèle (Faivre et al., 2013). Cette approche a néanmoins l'avantage d'être très efficace en termes de temps de calcul. La plus grande limite de cette approche basée sur les dérivés est qu'elle n'est pas justifiée lorsque l'entrée du modèle est très incertaine et lorsque le modèle est de linéarité inconnue. En d'autres termes, les dérivées ne sont informatives qu'au point de base où elles sont calculées et ne permettent pas d'explorer le reste de l'espace des facteurs d'entrée (Faivre et al., 2013). Ceci est relativement peu important pour les systèmes linéaires, dans lesquels la propriété à un point éloigné de la ligne de base peut être calculée rapidement par extrapolation linéaire en utilisant des dérivées ponctuelles de premier ordre (Saltelli et al., 2004), mais cela reste un vrai problème pour les modèles non linéaires.

III.4.2. Méthodes d'analyse de sensibilité globales

Depuis la fin des années 1980, pour surmonter les limites des méthodes locales (hypothèses de linéarité, variations locales...), une nouvelle classe de méthodes a été développée. Contrairement à l'analyse de sensibilité locale, cette méthode s'appelle « analyse de sensibilité globale » car elle prend en compte toute la plage de variation des variables d'entrées (Saltelli et al., 2000) (Figure 22).

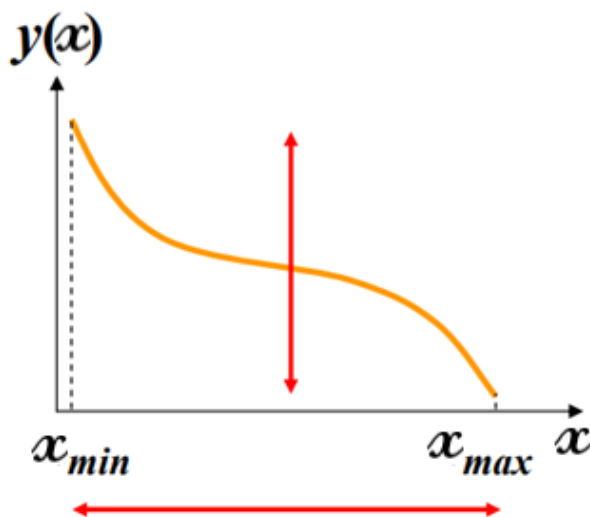


Figure 22 : Analyse de sensibilité globale (Faivre et al., 2013).

L'objectif de l'analyse de sensibilité globale est d'analyser la variabilité de $y(x)$ engendrée par la variation de x sur l'ensemble de son domaine de variation, permettant ainsi de répondre à de nombreuses questions pratiques (par exemple : l'identification des interactions entre variables d'entrée) (Faivre et al., 2013). L'analyse de sensibilité globale consiste donc à définir des

indices de sensibilité, calculés le plus souvent à partir de simulations, en faisant varier les facteurs incertains x_1, \dots, x_p sur l'ensemble de leurs domaines de variation.

Les modélisateurs ont montré un grand intérêt pour ces outils qui tirent pleinement parti de l'avènement du matériel informatique et des méthodes numériques (Iooss et Lemaître, 2015).

Dans cette étude nous nous intéressons particulièrement aux méthodes d'analyse de sensibilité globale.

III.4.2.1. Méthodes de criblage

Pour identifier les facteurs les plus importants parmi un grand nombre, le choix d'une méthode la moins chronophage possible est essentiel.

Les méthodes de criblage, ou « *screening* », sont peu coûteuse en temps de calcul et répondent donc à cette exigence. Elles permettent de faire une exploration rapide du comportement d'un modèle coûteux en temps d'exécution en faisant varier un grand nombre de ses entrées (quelques dizaines en général). Elles sont donc adaptées à un grand nombre d'entrées quantitatives, même si la pratique a souvent montré que seul un petit nombre d'entrées sont influentes. Les sorties doivent également être quantitatives. Les méthodes de criblage sont utilisées comme une première étape, car elles permettent de faire un premier tri parmi les facteurs selon leur influence. Elles fournissent une liste de facteurs classés par ordre d'importance décroissante, ce qui permet au modélisateur d'identifier le sous-ensemble des facteurs les moins influents. De telles méthodes permettent d'avoir une information globale sur le fonctionnement du modèle. Mais il convient de souligner qu'elles ne permettent pas de quantifier les interactions entre les variables (ou paramètres) d'entrée et repose fortement sur l'échantillonnage.

Il existe trois méthodes de criblage différentes :

- **Le criblage à très grande dimension (criblage par groupe)**, qui est adapté aux modèles possédant des dizaines à des centaines d'entrées.
- **Les plans d'expériences classiques**, qui sont adaptés lorsque le nombre de simulations et le nombre d'entrée sont du même ordre de grandeur.
- **La méthode de Morris**, plus coûteuse en temps de calcul mais nécessitant moins d'hypothèses sur le modèle. C'est cette méthode qui a été retenue dans cette étude.

III.4.2.2. Méthode de criblage de Morris

Pour faire une analyse de sensibilité, une méthode consiste à faire varier la valeur d'une variable en fixant la valeur des autres, ce qui permet de déterminer l'effet de ce facteur sur la sortie du modèle. Cette dernière méthode s'appelle *One-At-a-Time* (OAT). Cependant, il est plus souvent recommandé de faire une analyse de sensibilité globale qui utilise le principe de l'OAT sur des combinaisons de valeurs des paramètres ou variables incertains. Ainsi les interactions entre eux seront prises en compte et quantifiées (Iooss et Lemaître, 2015).

La méthode de Morris offre cette possibilité et permet de classer les entrées du modèle en trois groupes : les entrées ayant des effets négligeables, les entrées ayant de grands effets linéaires sans interactions et les entrées ayant de grands effets non linéaires et/ou d'interaction. Elle nécessite un nombre de répétition adéquat pour garantir une bonne précision des indices de sensibilité.

- **Principe de la méthode de criblage de Morris**

Soit un modèle qui comprend P variables dont la sortie est notée $y=f(x_1, \dots, x_P)$. L'exploration de y est réalisée sur une grille régulière superposée sur le domaine d'entrée du modèle.

La méthode consiste d'abord à discrétiser l'espace des entrées au moyen d'une grille pour chaque variable, puis à échantillonner chaque variable dans sa gamme de variation. Les valeurs de chaque variable sont choisies de manière aléatoire dans l'espace des entrées et la direction de la variation est également aléatoire (Campiongo et al., 2007). Un échantillonnage est ensuite réalisé pour définir les combinaisons des valeurs des variables d'entrée de manière à obtenir N simulations où $N= r \times (P +1)$, avec r , le nombre de répétition et P , le nombre de variables d'entrées. Des effets élémentaires, variation de y , sont estimés au moyen de trajectoires définies sur les nœuds de la grille varier chaque variable d'entrée une seule fois sur chaque trajectoire. En outre, on définit $d_{ij}(y)$ la variation de y sur la trajectoire i ($i = \dots, r$) relative à la variation de la variable d'entrée x_j . Enfin, l'ensemble du plan d'expérience (r répétitions) fournit un r -échantillon des effets élémentaires, chaque entrée $x_{j,r}$ doit être définie de façon à ce que tous les niveaux des gammes de valeurs des variables d'entrée soient pris en compte.

Ce processus se répète pour tous les N gammes de valeurs d'entrée jusqu'à l'obtention de tous les effets élémentaires de toutes les gammes de valeurs du plan d'expérience. Et à partir de ces effets, deux indices de sensibilité sont déterminés : la moyenne absolue (μ^*) et l'écart type (σ).

La moyenne absolue μ^* explique la sensibilité du modèle aux variables d'entrées et permet de classer les facteurs par ordre d'importance, tandis que l'écart type σ explique les interactions et les effets non linéaires entre les variables d'entrées (Figure 23).

L'effet élémentaire $E_j^{(i)}$ de la j -ème variable obtenu à la i -ème répétition (accroissement du modèle entre deux points successifs), est défini comme suit : $E_j^{(i)} = dij(y)$ Équation 1

$$\text{Avec } dij(y) = \frac{f(x^{(i)+\Delta e_j}) - f(x^{(i)})}{\Delta} \quad \text{Équation 2}$$

Où Δ est un multiple prédéterminé de $\frac{1}{(n-1)}$ et e_j un vecteur de la base canonique.

Les indices de sensibilité de Morris sont obtenus par les formules suivantes :

$$\mu_j^* = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R |E_j^{(i)}| \quad \text{Équation 3}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^R \left(E_j^{(i)} - \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R E_j^{(i)} \right)^2} \quad \text{Équation 4}$$

Avec R le nombre de répétitions ou trajectoires.

μ_j^* : **effet de premier ordre (ou linéaire)**. Représente la valeur absolue de la moyenne des effets élémentaires de la variable j .

σ_j : **effet second ordre ou d'interactions**. Représente l'écart type des effets élémentaires de la variable j .

- **Interprétation des résultats obtenus par la méthode de criblage de Morris**

L'interprétation des indices obtenus par la méthode de criblage de Morris est la suivante :

- μ_j^* est une mesure de l'influence d'une entrée j sur la sortie du modèle (effet linéaire). Plus elle est grande pour une variable, plus l'effet linéaire de la gamme de valeur de cette variable est grand ou plus cette variable contribue à la dispersion de la sortie, c'est-à-dire que cette variable a une influence sur la sortie. Un effet linéaire (ou de premier ordre) signifie que la variable d'entrée influente aura de façon autonome un impact sur l'incertitude ou sur les sorties du modèle.

- σ_j est une mesure des effets non linéaires et/ou d'interaction de l'entrée j sur la sortie du modèle. Si σ_j est petit, les effets élémentaires des entrées ont de faibles influences. A l'inverse, plus σ_j est grand, moins l'hypothèse de linéarité est probable. Ainsi, une variable avec une grande valeur de σ_j sera considérée comme ayant des effets non linéaires, ou étant impliquée dans une interaction avec au moins une autre variable (Saltelli et al., 2008). Un effet d'interaction (ou de second ordre) signifie que la variable d'entrée aura une influence sur les sorties en interaction avec une ou plusieurs autres variables d'entrée (Figure 23).

Finalement, la méthode Morris permet de classer les variables en 3 catégories (Figure 23) :

- Les entrées ayant des effets négligeables (1).
- Les entrées ayant des effets linéaires et sans interaction (2).
- Les entrées ayant des effets non linéaires et/ou avec interactions (3).

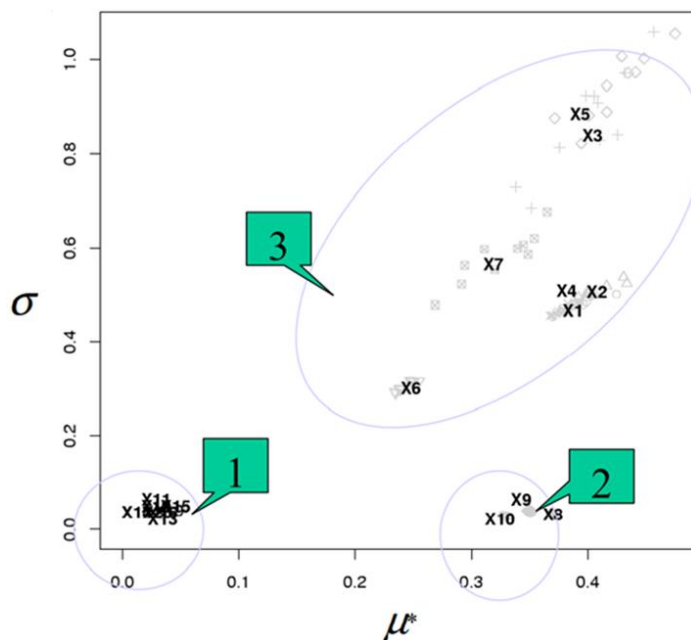


Figure 23 : Interprétation des indices de Morris (Campolongo et al., 2007).

IV.4.2.3. Autres méthodes globales

Une autre méthode plus élaborée que la méthode de Morris a été développée à partir de concepts provenant de l'analyse mathématique et numérique des fonctions de plusieurs variables. Les bases théoriques de cette approche ont été posées avant les années 1980, par Hoeffding, dans des travaux menés sur l'intégration en grande dimension en théories des probabilités et Sobol

en analyse numérique (méthode de Sobol). L'une des méthodes les plus couramment utilisées aujourd'hui est ensuite apparue en chimie : c'est la méthode dite FAST, pour Fourier Amplitude Sensitivity Test (Faivre et al., 2013). De nombreux développements ont été apportés à ces deux approches depuis les années 1980, produisant de nouvelles variantes. Le concept de mesure d'importance d'une variable dans un modèle a par exemple été utilisé par Ishigami et Homma en 1989 dans leurs travaux d'analyse de sensibilité pour quantifier les facteurs incertains pour des modèles numériques. Celui de la représentation HDMR (*High Dimensional Model Representation*) d'un modèle en grande dimension a été introduit par Rabitz et Alis (1999). Des améliorations techniques ont également été apportées aux méthodes FAST (Tarantola et al., 2006) et Sobol (Sobol, 1993). Les indices de sensibilité, calculés à la quatrième étape de l'analyse de sensibilité, peuvent être calculés à partir d'une décomposition de la variance, permettant d'aller plus loin dans une analyse de sensibilité par rapport aux autres méthodes locales ou globales. Ces indices permettent en effet d'estimer les effets principaux de tous les facteurs incertains (variables et/ou paramètres) et de bien évaluer les effets dus aux interactions entre facteurs.

Aujourd'hui, un large choix de méthodes est donc à la disposition des modélisateurs pour effectuer une analyse de sensibilité globale.

III.5. Critères de choix d'une méthode d'analyse de sensibilité

Les modèles complexes ont une forte probabilité de présenter des irrégularités, comme par exemple une non-linéarité des variables de sortie (y_i) du modèle en fonction des variables d'entrées (x_i). Un modèle complexe en cours de construction, dont nous ne connaissons pas encore le sens de variation de sa ou ses variable (s) de sortie et son degré de linéarité, demande beaucoup de compréhension avant de choisir une méthode. Le choix d'une méthode ne se fait pas au hasard, il existe des critères bien définis sur lesquels se baser pour cela.

Le choix d'une méthode d'analyse de sensibilité peut être guidé d'après Faivre et al. (2013) par :

- **Le nombre de simulations réalisables (N).** Le nombre de simulations définit le temps de simulation du modèle pour faire cette analyse. Il peut être très grand en fonction de la méthode utilisée, de l'ordre de dizaine de milliers par variable d'entrée. Il est obtenu par $R(P+1)$ pour la méthode de Morris, $R(P+2)$ pour la méthode de Sobol, RP pour la méthode FAST (avec r le nombre de répétition et P le nombre de variables d'entrée).

- **Le nombre de variables.**
- **Le type des variables d'entrées** (continues¹⁴, discrètes¹⁵ ou qualitatives¹⁶).

Une grille de sélection a été définie pour orienter le choix de la méthode 'analyse de sensibilité en fonction de ces critères (Figure 24). Lorsque les facteurs d'entrées sont qualitatifs ou discrets et que le nombre de facteurs d'entrée considérés est petit, les méthodes de plans d'expériences classiques peuvent être utilisées (avec ou sans considération des interactions entre les facteurs), pour un nombre de simulations relativement faible par rapport à l'ensemble des méthodes disponibles. Si en revanche le nombre de facteurs d'entrée considérés est très élevé, la méthode de criblage à très grande dimension (criblage par groupe) peut être utilisée. Si les facteurs d'entrée sont continus, il est possible d'utiliser les méthodes suivantes :

- La méthode de Morris (études préliminaires pour faire un premier tri des facteurs selon leur importance), qui demande un nombre de simulations pouvant être très grand en fonction du nombre de répétition.
- Les méthodes FAST et Sobol, qui permettent de quantifier les principaux effets y compris les interactions entre variables. Ces méthodes requièrent plus de simulations que la méthode de Morris.
- Les méthodes associant un échantillonnage en hypercube latin ou selon la méthode de Monte Carlo et des métamodèles (ou surface de réponse). Ces méthodes ne sont pas présentées dans cette étude. Ces méthodes requièrent plus de simulations que la méthode de Morris, Fast et Sobol et sont donc très couteuse en termes de temps de calcul.

¹⁴ Une variable est continue si elle prend un nombre infini de valeurs réelles possibles à l'intérieur d'un intervalle donné. Exemple : la taille d'un arbre (1.65 m).

¹⁵ Contrairement à une variable continue, une variable discrète ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs réelles possibles à l'intérieur d'un intervalle donné. Exemple : le nombre d'arbre (qui ne peut pas être infini).

¹⁶ Par exemple la couleur des feuilles ou des fleurs des plantes.

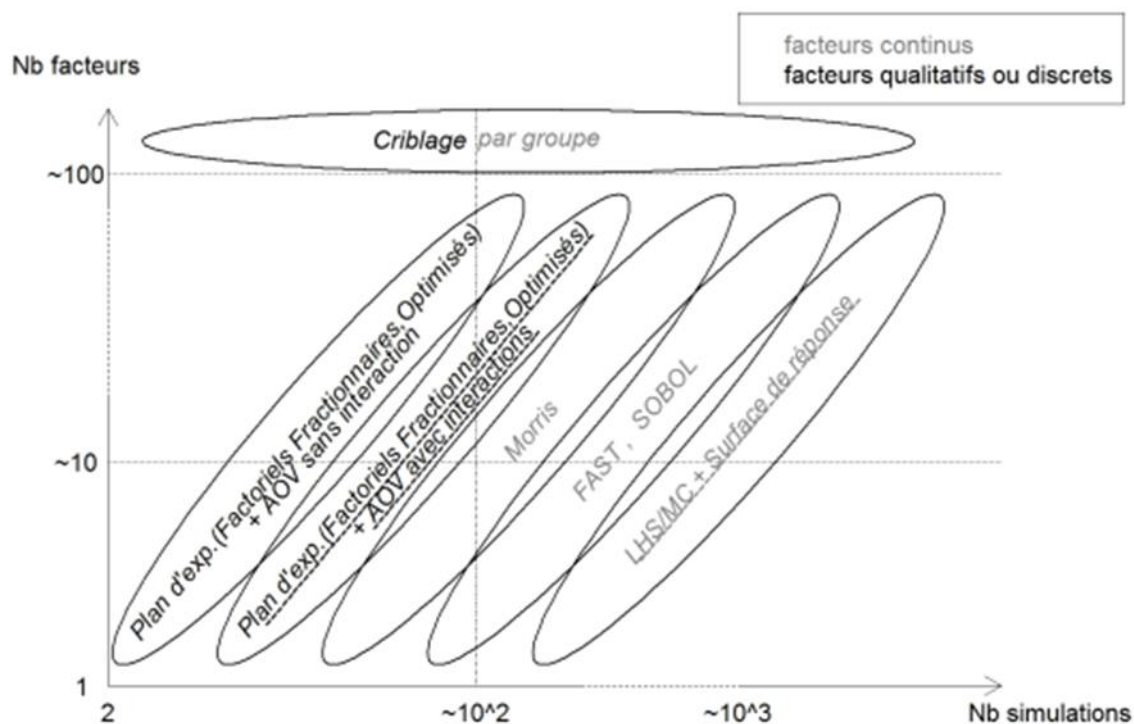


Figure 24 : Grille de sélection d'une méthode d'analyse de sensibilité (Favre et al., 2013).

Nous nous sommes basés sur cette grille pour faire le choix de la méthode utilisée dans cette étude (Figure 24). L'outil J-Distas étant en cours de construction, nous devons d'abord faire un premier tri des variables d'entrées influentes avant de procéder aux analyses de sensibilité beaucoup plus sophistiquées, qui peuvent permettre de quantifier tous les principaux effets. Pour réaliser ce tri, nous devons également choisir une méthode raisonnablement gourmande en temps de simulation. Les variables d'entrées utilisées sont des variables continues. A partir de ces critères, nous avons choisi la méthode de Morris, qui correspond aux objectifs que nous voulons atteindre dans le cadre de ce travail.

Partie IV

IV. Matériels et Méthodes

Cette quatrième partie décrit en détail la méthodologie utilisée pour atteindre les objectifs fixés dans cette étude, c'est-à-dire la mise en œuvre de l'analyse de sensibilité du modèle J-Distas.

IV.1. Contexte de l'analyse de sensibilité

IV.1.1. Sources des données utilisées

Les données que nous avons utilisées dans cette étude proviennent des bases de données d'Arvalis. Pour simuler les nombres de jours disponibles pour une opération culturale donnée, des données sur le sol, le climat et les machines agricoles utilisées sont mobilisées. Les données sur les caractéristiques des sols sont collectées sur Soilbox, une base de données interne à Arvalis qui contient des données sur de nombreux sols en France. L'outil permet de connaître pour chaque type de sol : sa granulométrie (teneur en argiles, sables et limons), son taux de matière organique, la densité apparente de la terre fine (< 2 mm) et la teneur en cailloux. Pour chaque propriété, les valeurs moyennes, minimales et maximales sont fournies par horizon de sol. Les données sur les machines agricoles proviennent également de la base de données machines d'Arvalis. Les données météorologiques utilisées sont les données historiques journalières pour l'année ou la période ciblée, provenant de la station météorologique la plus proche du site ou terrain étudié. L'outil J-Distas est connecté à une base de données météorologiques et extrait les données nécessaires de manière automatique, à partir des coordonnées géographiques du site d'intérêt.

IV.1.2. Opération culturale traitée dans l'étude

L'opération culturale qui est concernée par cette étude est la destruction de couvert avant l'implantation de maïs (*Zea mays*, L.). Un couvert végétal est un ensemble de végétaux qui occupent un sol de façon temporaire ou permanente selon l'occupation du sol. Dans un sol cultivé, on rencontre plutôt des couverts temporaires ou des plantes d'interculture qui doivent être détruits avant l'implantation d'une culture principale. Leur destruction au sein d'une parcelle agricole est réalisée avec une machine agricole et dépend de différentes variables telles que l'espèce concernée, la culture suivante, les conditions climatiques et le type de sol (Tableau 3). Ces variables doivent être prises en compte pour connaître les jours disponibles pour réaliser les opérations culturales dans de bonnes conditions agronomiques, sans qu'il y ait de risques de tassement en surface et en profondeur. Les jours qui seront considérés comme disponibles dépendront donc de ces variables.

Tableau 3 : Date conseillée de destruction des couverts, en fonction du sol et de la culture suivante (Brun et Labreuche, 2020).

Type de sol	Culture suivante		
	Blé, orge d'hiver	Betterave, lin, orge, pois et féverole de printemps	Maïs, tournesol
Limon sain, craie, sable	Juste avant le semis	De mi-novembre à mi-décembre	De novembre à février (au plus tard, début mars)
Limon argileux, sol argilo-calcaire	Juste avant le semis	De mi-novembre à mi-décembre	Labour : dès le 15 novembre Non-labour : entre le 15 novembre et le 1 ^e février selon le climat et vitesse de ressuyage
Sol argileux	Non-labour : juste avant le semis Labour : anticiper la date de destruction et de labour	Non-labour : 15/11 Labour : anticiper la date de destruction et de labour	Non-labour : mi-novembre à mi-décembre Labour : anticiper la date de destruction et de labour

IV.1.3. Machine agricole choisie

Nous avons choisi une machine couramment utilisée pour la destruction de couvert chez Arvalis : un grand tracteur à 300 chevaux avec un poids total pleine charge de 14500 Kg, dont 40 % du poids repose sur l'essieu avant et 60 % repose sur l'essieu arrière. Des pressions de gonflage de 1.10 bar pour les roues avant et 1.55 bar pour les roues arrière sont utilisées pour définir la machine de base. Cette machine a été caractérisée avec l'aide des experts d'Arvalis.

IV.1.4. Données sur le sol

Trois types de sols ont été choisis dans les sites ou parcelles agricoles français disponibles dans la base de données de sol d'Arvalis (SoilBox). Chacun se trouve dans une région différente pour obtenir une certaine variabilité entre eux.

Les trois types de sols choisis sont les suivants :

- **Centre-Val de Loire** : Sol sablo-limoneux profond hydromorphe sur argile sableuse.
- **Île-de-France** : Sol limono-argileux à argilo-limoneux profond sur calcaire dur.
- **Picardie** : Sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur.

Le sol situé en Centre-Val de Loire se distingue par sa texture sablo-limoneuse. Les sols d'Ile-de-France et de Picardie ont des textures similaires, mais le sol d'Ile-de-France est plus profond, alors que le sol de Picardie est plus riche en cailloux.

Il faut souligner que chacun de ces types de sol correspond à une coordonnée géographique de d'un site dans chaque zone en question. Ces sols ne sont pas forcément représentatifs de leurs régions respectives, mais ils y sont localisés.

Le coefficient de percolation¹⁷ est une variable importante de la perméabilité d'un sol à l'eau, car il permet de déterminer le déplacement de l'eau à l'intérieur du sol. C'est une donnée mesurée sur le terrain. De ce fait, dans cette étude, nous avons utilisé les gammes de variations du coefficient de percolation qui ont été mesurées dans des expérimentations d'Arvalis et dépendant du type de sol. Un coefficient de percolation a été attribué à chaque type de sol en fonction de ses caractéristiques. Les valeurs choisies par type de sol sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Coefficient de percolation en fonction du type de sol (Base de données Arvalis)

Vitesse de ressuyage	Nombre de jour	Type de sol	Coefficient de percolation (CP)
Ressuyage très rapide	1	sable pur	
	2	craie, argilo-calcaire caillouteux, graviers	0.9
Ressuyage rapide	3	limons sableux sain	0.8
	4	Argilo-calcaire profond, limon argileux	0.65
Ressuyage assez lent	5	limon profond, sol argileux sain	0.56
	6	Limon hydromorphe, limon sableux hydromorphe	0.49
Ressuyage lent	7	argile hydromorphe	0.43
	8		0.39

¹⁷ Traversée du sol, du haut en bas, par les eaux de précipitation ou d'irrigation et les substances qu'elles entraînent. La percolation diffère de l'infiltration et de la filtration car elle désigne essentiellement l'écoulement de l'eau par les fissures, lacunes ou galeries d'animaux, donc l'écoulement d'une eau qui transite rapidement (d'après Lozet et Mathieu, 1997).

Ressuyage très lent	9		0.35
	10	Marais argileux	0.32

Tableau 5 : Coefficient de percolation choisi par site de simulation.

Région des sites	Coefficient de percolation (CP)
Centre-Val de Loire	0.55
Île-de-France	0.65
Picardie	0.65

IV.2. Réalisation de l'analyse de sensibilité et plan de simulation utilisé dans cette étude

IV.2.1. Choix des environnements de l'étude

Pour chacun des trois sols choisis, nous avons défini un environnement de simulation type en utilisant les données moyennes des propriétés des sols (granulométrie, teneur en matière organique profondeur du sol) (voir annexe 4 pour plus de détails). Puis nous avons fait varier les valeurs de granulométrie et de teneur en matière organique dans la gamme de variation bornée par leur valeurs minimales et maximales, de manière à définir 5 autres environnements de simulation par type de sol. Les propriétés des sols n'ont pas été considérées en tant que variables d'entrée étudiées dans l'analyse de sensibilité, car il n'est pas possible de les faire varier indépendamment les unes des autres tout en gardant des types de sols cohérents. C'est particulièrement vrai en ce qui concerne la granulométrie et la matière organique, qui doit sommer à 100% pour le modèle CHN par exemple. Ces variations sont faites de façon à conserver le même type de sol que l'environnement type. Par exemple, le sol d'Île-de-France, qui est de base un sol limono-argileux à argilo-limoneux profond sur calcaire dur, reste le même pour n'importe quelle variation effectuée. Les autres variables (comme la profondeur du sol, la charge en cailloux, etc.) sont restées fixes pour n'importe quelle variation.

Les six environnements par site sont présentés dans les Tableau 6, Tableau 7 et Tableau 8. L'analyse de sensibilité est réalisée sur chacun de ces 18 environnements.

Tableau 6 : Présentation des six environnements définis à partir du sol de Centre-Val de Loire.

ECE	Horizon	CP	MO	Sable fin en %	Sable grossier en %	Limon fin en %	Limon grossier en %	Argile en %
E1	H1	0.49	1.8	25	50	5	5	13.2
	H2		0	25	45	4	1	25
	H3		0	16	36	10	1	37
E2*	H1	0.49	0.76	23.8	46.6	14.7	5.34	8.8
	H2		0.52	20.4	30.6	14.5	10.98	23
	H3		0.64	14.1	34.9	10.5	4.46	35.4
E3	H1	0.49	3	15	57	7	8	10
	H2		1	10	50	6	3	30
	H3		0.2	15	35.5	12	1.3	36
E4	H1	0.49	1	20	53	5	6	15
	H2		0.3	17	39.7	10	5	28
	H3		0.4	5.6	30	11	8	45
E5	H1	0.49	2.5	18	36.5	6	7	30
	H2		0.8	15.2	37	12	8	27
	H3		0.3	18	25	13	5	38.7
E6	H1	0.49	1.5	21.5	38	10	9	20
	H2		0.65	22	32	5	4	36.35
	H3		0.5	20	20	15	2	42.5

E2*représente l'environnement type

Tableau 7 : Présentation des six environnements définis à partir du sol d'Île-de-France.

EIL	Horizon	CP	MO	Sable fin en %	Sable grossier en %	Limon fin en %	Limon grossier en %	Argile en %
E1	H1	0.65	1	8	1	35	10	45
	H2		0.5	1	1	30	25	42.5
E2*	H1	0.65	3	10	7	15	30	35
	H2		1.3	3.2	2.5	35	30	28
E3	H1	0.65	1.9	3.3	5.8	30	28.1	30.9
	H2		0.9	4.3	3.8	29	26	36
E4	H1	0.65	2	1	10	22	25	40
	H2		1	1.5	1.5	25	27	44
E5	H1	0.65	1.5	6	15	20.5	15	42
	H2		0.7	10	4.3	27	28	30
E6	H1	0.65	2.5	5	4.5	25	25	38
	H2		1.2	2.3	10	26	25.5	35

Tableau 8 : Présentation des six environnements définis à partir du sol de Picardie.

EP I	Horizon	CP	MO	Sable fin en %	Sable grossier en %	Limon fin en %	Limon grossier en %	Argile en %
E1	H1	0.65	2	5	5	35	20	33
	H2		1	5	5	19	35	35
E2*	H1	0.65	4	9	15	14	29	29
	H2		1.5	10	15	15	28.5	30
E3	H1	0.65	1	15	10	24	15	35
	H2		2	15	7	35	15	26
E4	H1	0.65	3	10	7	30	25	25
	H2		1.2	7	10	30	20	31.8
E5	H1	0.65	3.5	7	12	20	35	22.5
	H2		1.7	12	9	22	18	37.3
E6	H1	0.65	2.5	11	9	22	18	37.5
	H2		2	6	6	20	25	41

IV.2.2. Variables étudiées dans l'analyse de sensibilité de Morris et hypothèse utilisée pour faire varier les variables

Dans cette étude, nous avons analysé le comportement des sorties du modèle J-Distas, c'est-à-dire le nombre de jours disponibles pour réaliser la destruction de couvert avant semis du maïs, par rapport à certaines de ses variables d'entrées connues comme étant influentes selon les dires des experts ou les études précédentes. Les variables d'entrées des outils intermédiaires (Terranimo® et CHN) constituant l'outil J-Distas ne sont pas concernées par cette étude. Les variables dont nous avons étudié l'influence sur le nombre de jours disponibles simulé par l'outil J-Distas sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Variables étudiées dans l'analyse de sensibilité de Morris.

Type	Variables d'entrée
Sol	Coefficient de percolation (dépendant du type de sol)
Machine	Poids total pleine charge
	Répartition du poids de la machine sur les essieux (roues avant et arrière)
	Pression de gonflage des roues avant
	Pression de gonflage des roues arrière

Pour faire varier le coefficient de percolation, nous avons utilisé les seuils du coefficient de percolation de l'institut de recherche Arvalis (Annexe 1). Ce coefficient dépendant du type de sol, les gammes de variation sont choisies pour chaque type de sol étudié dans cette étude. Elles sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Gamme de variation du coefficient de percolation choisie.

Site	Seuil de percolation
Île-de-France	0.32-0.9
Picardie	0.32-0.9
Centre-Val de Loire	0.49-0.8

Les variations des variables machines pour le plan de Morris sont faites en fonction des poids minimum et maximum des tracteurs utilisés dans la destruction de couvert, et des pressions de gonflage des roues couramment utilisées pour les roues de ces tracteurs. Les seuils sont choisis avec l'aide des experts d'Arvalis et sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Gamme de variation des variables des machines agricoles choisie.

Variables machines	Valeur minimale	Valeur maximale
Poids total pleine charge (en Kg)	8155	27000
Répartition du poids de la machine sur les essieux	35% du poids total pleine charge sur les essieux avant (et donc 60% sur les essieux arrière).	45% du poids total pleine charge sur les essieux avant (et donc 60% sur les essieux arrière).
Pression de gonflage des roues avant (en bar)	0.6	1.6
Pression de gonflage des roues arrière (en bar)	0.4	2.7

Pour que les caractéristiques de la machine restent cohérentes, nous avons choisi d'étudier la répartition du poids de la machine sur les essieux plutôt que d'étudier les poids par essieux séparément. Dans le cas contraire, les variations imposées sur les données d'entrées n'auraient pas respecté les caractéristiques de la machine (somme du poids par essieu égal au poids total de la machine, poids sur l'essieu arrière plus important que sur l'essieu avant).

IV.2.3. Définition du plan d'expérience de Morris

Les variables à fournir pour définir le plan d'expérience sont :

- 1) Le nombre de variables d'entrées à considérer dans l'analyse de sensibilité : les cinq variables ($P=5$) présentés dans le Tableau 9 sont ceux à faire varier dans le plan de Morris.
- 2) Le nombre de répétitions : R.

R est à définir pour que l'analyse de sensibilité soit optimale. Pour cela, nous avons cherché la valeur de R pour laquelle les indices de sensibilité se stabilisaient, pour faire un compromis entre une incertitude sur les indices de sensibilité acceptable et le temps de calcul, qui dépend de la valeur de R (plus elle est élevée, plus les temps de calcul sont importants). Nous avons pour cela estimé la variation des indices de sensibilité μ^* et σ pour plusieurs niveaux de R (5, 10, 15, 20, 30 et 50). Nous avons répété 5 fois l'analyse de sensibilité pour chaque valeur de r testée. La dispersion de ces 5 répétitions est ensuite évaluée (calcul de l'écart type des indices de sensibilité). Ces calculs étant très longs, nous

avons choisi de réaliser les simulations J-Distas uniquement sur les 3 dernières années de la période de simulation (Tableau 12).

Le temps de calcul pour une simulation avec les 3 années est en effet de 3 minutes pour un environnement. Le nombre de simulation est défini par $r(P+1)$. Le temps de calcul est donc de 7.5 heures pour $R = 5$ (30 simulations) en utilisant un ordinateur qui dispose 16 Go RAM, un disque de 460 Go, 2 cœurs et 4 processeurs, de 15 heures pour $R = 10$ (60 simulations), de 22.5 heures pour $R = 15$ (90 simulations), de 30 heures pour $R = 20$ (120 simulations) ainsi de suite jusqu'à $R = 50$ (300 simulations), ce qui fait en total 195 heures pour un environnement (environ 8 jours au complet). Nous devons tester des niveaux de r plus élevé également, mais pour aller jusqu'à $R = 100$, cela aurait nécessité environ 6 jours supplémentaires. Nous avons donc fixé une valeur maximale de $R = 50$.

Tableau 12 : Plan de simulation pour le choix de la valeur de R .

Facteur	Nombre	Commentaire
Type de sols	3	Superficiel/Profond/argile/limon/sable/teneur en matière organique/coefficient de percolation
Environnement	3	1 environnement par type de sol
Années simulées	3 ans	2018 à 2021
Période concernée pour le calcul des jours disponibles	1	01 décembre de l'année n-1 au 31 mars de l'année n
Culture d'intérêt	1	Maïs (<i>Zea mays</i> L.)
Opération culturale simulée	1	Destruction de couvert

3) Le plan d'expérience : ici OAT

- Nombre de niveau : levels = 10
- Saut : grid jump = 5

Condition : en général grid jump = levels/2

Le nombre de niveau et de saut sont utilisés dans le plan de Morris pour définir le nombre de pas à effectuer pour choisir chaque valeur d'une variable pour chaque combinaison. Avec 5 variables d'entées discrétisées en 10 niveaux. Si $R = 100$ par exemple, 100 trajectoires (de tailles $5 + 1$) seront échantillonnées avec un saut de 5 unités successivement sur chaque composante de l'échantillonnage.

Cet échantillonnage est réalisé de façon automatique avec la fonction du package « sensitivity » sur Rstudio.

IV.2.4. Calcul du nombre de jours disponible pour la destruction de couvert et plan de simulation de l'analyse de sensibilité

Le nombre de jours disponibles pour détruire le couvert est estimé grâce à l'outil J-Distas sur la période du 1^e décembre au 31 mars (121 jours), avant l'implantation du maïs en avril. Les calculs sont réalisés sur 18 années passées, sur la période allant de 2003 à 2021. Sur toutes ces années, des simulations journalières sont réalisées sur les 121 jours. Pour réaliser les calculs, J-Distas fait appel à l'outil CHN pour calculer l'humidité du sol afin de prédire si le sol est *travaillable* et à l'outil Terranimo® pour prédire la résistance au tassement qui va dire s'il y a un risque de tassement ou non. La combinaison de ces résultats va permettre à J-Distas de simuler le nombre de jours disponibles pour réaliser la destruction de couvert. Pour cela, des règles de décision spécifique à la destruction de couvert ont été fixées à dire d'expert (Annexe 7) en fonction des seuils limites définis selon les conditions du sol, du climat et de la culture en question. Dans notre cas, c'est l'implantation du maïs (*Zea mays* L.) qui est visée après la destruction du couvert. Le semis du maïs est simulé le 15 avril 2021. Pour ce faire, la période visée pour simuler le nombre de jours disponibles varie du 1^e décembre de l'année 2020 au 31 mars 2021, puisque l'opération doit être réalisée avant le semis. Les simulations sont réalisées sur 121 jours afin de pouvoir déterminer le nombre de jours disponibles sur cette période pour réaliser l'opération de destruction de couvert. Les calculs sur les années précédentes (2003-2020) permettent de prendre en compte l'impact de la variabilité du climat sur les résultats. En résumé, les calculs sont réalisés sur une période de 121 jours depuis 2003 (saison débutée au 1^e décembre 2002) jusqu'à 2021 avant un semis au 15 avril de l'année suivante. L'ensemble des variables définissant le plan de simulation est rappelé dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Plan de simulation pour l'analyse de sensibilité.

Facteur	Nombre	Commentaire
Type de sols	3	Superficiel/Profond/argile/limon/sable/teneur en matière organique/coefficient de percolation
Environnement	18	6 environnements par type de sol
Années simulées	19 ans	2003 à 2021
Période concernée pour le calcul des jours disponibles	1	01 décembre de l'année n-1 au 31 mars de l'année n
Culture d'intérêt	1	Maïs (<i>Zea mays</i> L.)
Opération culturale simulée	1	Destruction de couvert

Ayant opté pour la méthode de Morris, les indices de sensibilité μ^* et σ sont calculés pour étudier les effets des variables d'entrées sur le nombre de jours disponibles pour réaliser la destruction de couvert, et ceci pour chaque environnement étudié. Pour chaque simulation, une combinaison de variables d'entrée est définie (Annexe 5. Exemple de combinaison pour 5 répétitions).

IV.3. Récapitulatif des outils utilisés

Dans le cadre de cette étude, les logiciels suivants sont utilisés :

- **SoilBox**, outil développé par Arvalis pour stocker les données sur les caractéristiques des sols, a été utilisé pour recueillir les données sur les types de sols étudiés.
- **Excel**, qui a été utilisé à plusieurs fins :
 - Accès à l'outil SoilBox, utilisable via ce logiciel pour accéder aux données sur les caractéristiques des sols.
 - Pour analyser, traiter et mettre en forme certains résultats.
 - Enfin, réaliser certains graphiques des résultats de simulation.
- **Rstudio** : presque tout le travail a été réalisé via cet outil de programmation sous forme de scripts R. La plateforme J-Distas pour simuler le nombre de jours disponibles, pour réaliser les opérations dans de bonnes conditions agronomiques sans risque de tassement, est utilisable via ce logiciel. Toutes les simulations sont faites à l'aide des scripts R.

Partie V

V. Résultats et discussion

Cette partie du mémoire est consacrée à la présentation des résultats obtenus grâce à l’outil J-Distas pour répondre à la question suivante : quels sont les variables d’entrée de l’outil ayant une influence sur les sorties ? Cette question est appliquée dans le cadre de la destruction de couvert avant la culture du maïs. Dans un premier temps, nous allons présenter le nombre de jours estimés disponibles pour des sols agricoles qui se trouvent dans trois régions métropolitaines (Île-de-France, Centre-Val de Loire et Picardie), en considérant six environnements par régions de manière à estimer si l’outil J-Distas est sensible aux variables d’entrée variant d’un environnement à l’autre. Dans un second temps, nous présenterons les résultats de l’analyse de sensibilité réalisée avec la méthode de Morris et permettant de déterminer la sensibilité de l’outil J-Distas aux variables d’entrées. A noter que les résultats d’analyse de sensibilité peuvent servir de base pour évaluer l’outil J-Distas et encadrer son utilisation comme Outil d’Aide à la Décision stratégique.

V.1. Nombre de Jours Disponibles pour la destruction de couvert : impact de l’environnement

Pour chaque environnement considéré, les jours disponibles sont estimés de 2003 à 2021, pour la période du 01/12/n-1 au 31/03/n.

Les Figure 25, Figure 26 et Figure 27 et le Tableau 14 montrent le nombre de jours disponibles annuel pour réaliser la destruction de couvert dans de bonnes conditions agronomiques et sans risque de tassement superficiel et profond, pour les environnements des 3 types de sols (situés en Île-de-France, Centre-Val de Loire et Picardie), avec un seul type de machine agricole (tracteur de poids moyen, 300 chevaux).

De façon générale, nous pouvons observer que l’outil J-Distas prévoit qu’il y a des jours disponibles toutes les années simulées, quel que soit l’environnement considéré (pour les six environnements étudiés pour chacun des trois types de sol), à l’exception d’une année en Picardie (2009) et deux années en *Centre-Val de Loire* (2008 et 2019) pour lesquelles aucun jour disponible n’est prédit. Le nombre de jours disponibles par saison culturale varie de 19 à 55 jours pour le sol situé en Île-de-France (sol limono-argileux à argilo-limoneux profond sur calcaire dur), qui présente les plus grands nombres de jours disponibles sur les périodes simulées, soit 121 jours du 1^e décembre de l’année n-1 au 31 mars de l’année n (Figure 25 et

Tableau 14). Il est suivi du sol situé en Picardie (sol limono-argileux à argilo-limoneux calcaire caillouteux superficiel sur calcaire dur), qui présente un nombre de jours disponibles allant de 0 à 36 jours disponibles par saison culturale sur les 121 jours considérés (Figure 26 et Tableau 14). Le nombre de jours pour le type de sol situé en *Centre-Val de Loire* (sol sablo-limoneux profond hydromorphe sur argile sableuse) est un peu plus faible que les autres avec une variation de 0 jour à 21 jours disponibles par saison culturale (Figure 27 et Tableau 14). Ces résultats montrent qu'il y a une influence des propriétés des sols sur le nombre de jours disponibles simulés lorsque celles-ci varient suffisamment pour que le type de sol soit modifié.

Pour chacun des 3 types de sol considéré, aucune variation du nombre de jours disponibles n'a été observée entre les environnements, et ce, quelle que soit la saison culturale considérée. Pour toutes les années étudiées, le nombre de jours disponibles reste le même quel que soit l'environnement de ce type de sol. Il n'y a donc pas d'influence de la texture des sols et de la teneur en matière organique lorsque des gammes de variation restreintes sont considérées et que l'on reste sur un même type de sol (

Annexe 4) :

- 8.8 % à 45.00 % d'argile, de 5.00 % à 25.48 % de limon, de 40.00 % à 75.00 % de sable et de 0 % à 3.00 % de matière organique pour le sol situé en Centre-Val de Loire,
- 28.00 % à 45.00 % d'argile, de 45.00 % à 65.00 % de limon, de 2.00 % à 21.00 % de sable et de 1.00 % à 3.00 % de matière organique pour le sol situé en Île-de-France,
- 25.00 % à 41.00 % d'argile, de 39.00 % à 55.00 % de limon, de 10.00 % à 25.00 % de sable et de 1.00 % à 4.00 % de matière organique pour le sol situé en Picardie.

Cependant, de fortes variations du nombre de jours disponibles entre les années sont observées pour chacun des 3 types de sols. En Île-de-France, les observations montrent que 25 % des 19 années simulées ont un nombre de jours disponibles inférieur ou égal à 26 jours (quartile 1) et 75 % ont un nombre de jours inférieur ou égal à 36 jours (quartile 3) pour une variation totale de 19 jours (minimum) à 55 jours (maximum). Une forte variation est également observée pour le sol situé en Picardie, lequel présente un nombre de jours disponibles inférieur ou égal à 12 pour 25 % des années simulées (quartile 1) et à 31 jours pour 75 % des années simulées (quartile 3). La même observation est valable pour le sol situé en Centre-Val de Loire, où 25 % des années présentent un nombre de jours disponibles inférieur ou égal à 2 jours (quartile 1) et 75%

un nombre de jours disponibles inférieur ou égal à 14 jours (quartile 3). Le sol situé en Centre-Val de Loire présente le nombre de jours disponibles le plus faibles parmi les 3 zones étudiées.

Tableau 14 : Récapitulatif des nombres de jours disponibles pour chacun des trois sols étudiés.

Région	Nombre de jours de 2003 à 2021					
	Minimum	Quartile 1	Moyenne	Médiane	Quartile 3	Maximum
Île-de-France	19.00	26.00	31.79	29.00	36.00	55.00
Picardie	0.00	12.00	19.37	17.00	31.00	36.00
Centre-Val de Loire	0.00	2.00	8.32	8.00	14.00	21.00

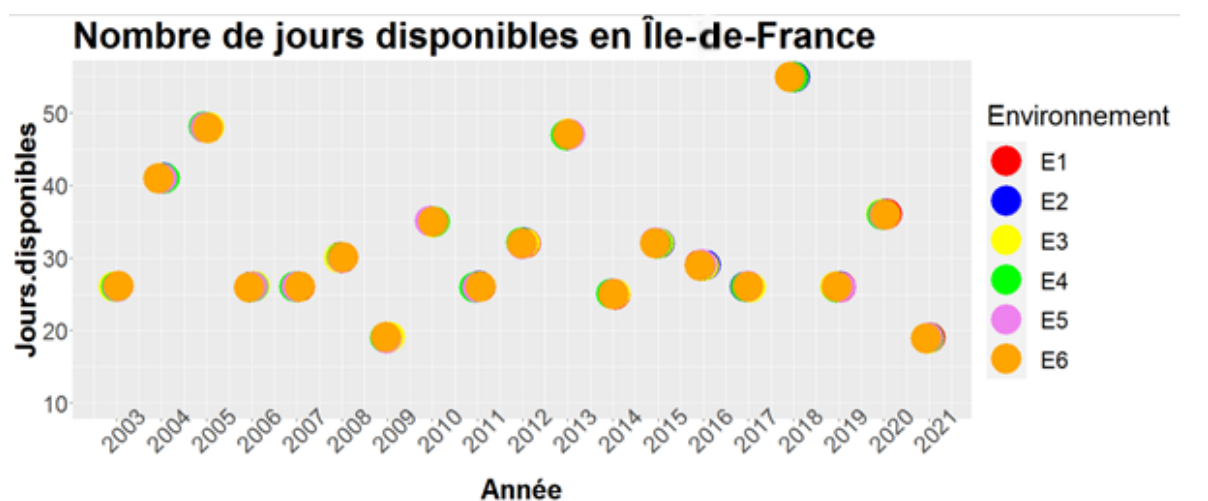


Figure 25 : Nombre de jours disponibles pour le sol situé en Île-de-France sur la période de 2003 à 2021. Les symboles sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres pour que les points se superposant soient visibles.

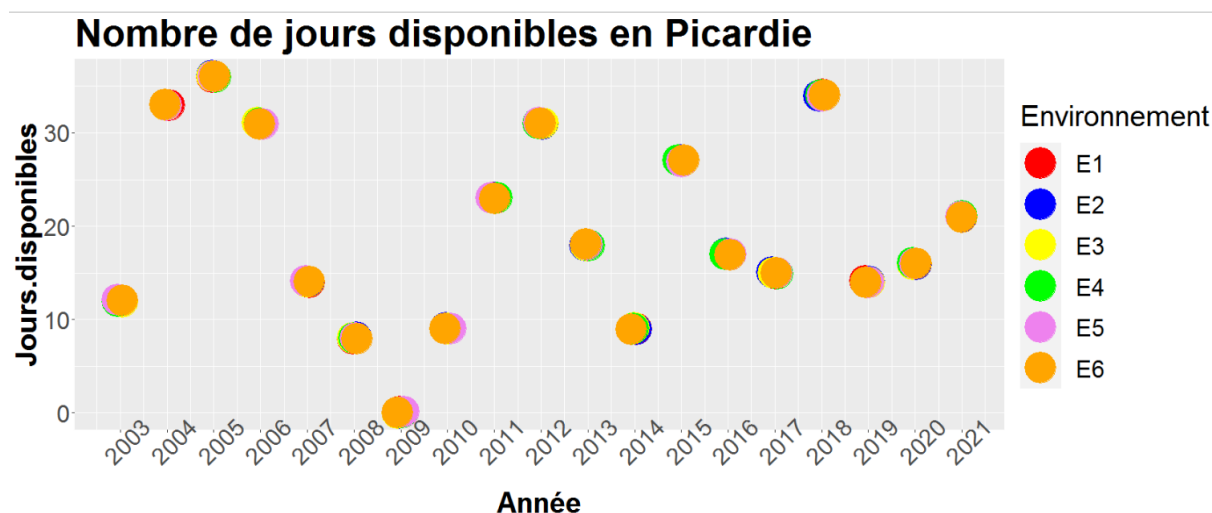


Figure 26 : Nombre de jours disponibles pour le sol situé en Picardie sur la période de 2003 à 2021. Les symboles sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres pour que les points se superposant soient visibles.

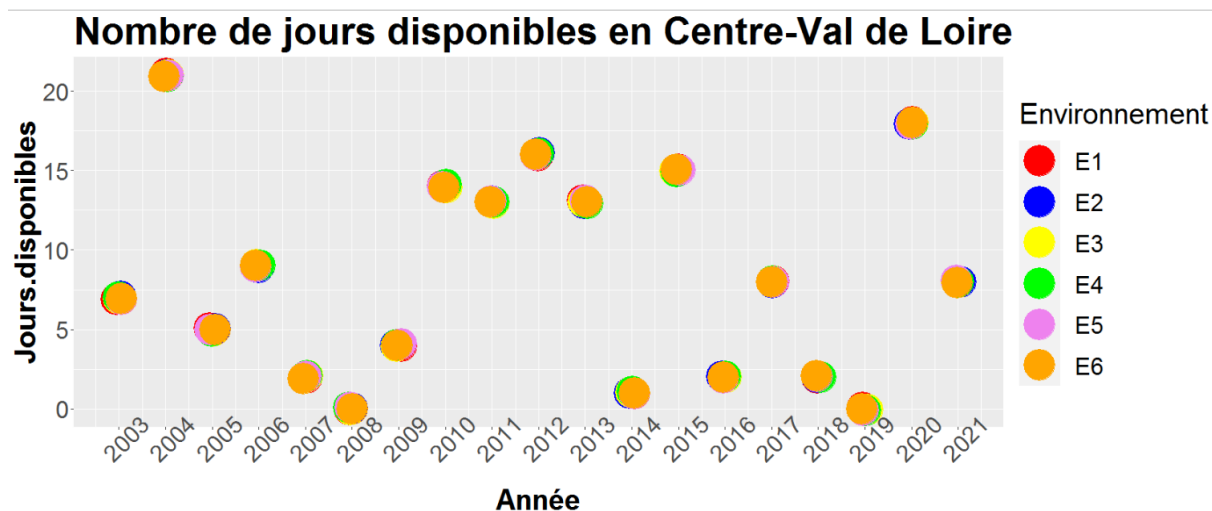


Figure 27 : Nombre de Jours Disponibles pour le sol situé en Centre-Val de Loire sur la période de 2003 à 2021. Les symboles sont légèrement décalés les uns par rapport aux autres pour que les points se superposant soient visibles.

La variabilité du nombre de jours disponibles observée entre les années pour chaque type de sol peut s'expliquer par des différences de climat, qui influent sur l'humidité des sols et donc leur vulnérabilité au tassement.

L'absence de différences constatées entre les environnements pour chacun des 3 types de sols indique que de faibles variations de la matière organique et de la texture d'un sol n'influe pas sur les résultats de l'outil. En revanche, les différences de nombre de jours disponibles entre les types de sol (situé en Centre-Val de Loire, Picardie et Île-de-France) montrent que l'environnement pédoclimatique influe sur les résultats. Des analyses complémentaires sont à conduire pour déterminer si c'est la variation de climat ou du type de sol (avec une forte variation de texture, des différences de profondeur et de charges en cailloux, etc.), qui influe le plus sur les résultats. En effet, le sol situé en Picardie se différencie du sol situé en l'Île-de-France par sa profondeur plus faible et sa teneur en cailloux qui est de 28 % contre 0 %.

Les sols situés en Centre-Val de Loire étant de type sablo-limoneux, ils devraient être moins sensibles au tassement que les deux autres sols étudiés (Imhoff et al., 2004). Mais d'autres facteurs entrent en jeu : le sol situé en Centre-Val de Loire ayant une hydromorphie élevée, c'est-à-dire que leurs pores peuvent être saturés d'eau sur une période plus ou moins longue de l'année¹⁸, leur capacité de ressuyage¹⁹ après la pluie peut être lente par rapport aux deux autres

¹⁸ Risque d'excès d'eau temporaire (généralement hivernal) ou permanent qui se manifeste par des signes visuels spécifique qui sont des taches de couleur grise pour l'excès permanent et une couleur rouille pour l'excès d'eau temporaire (Baize, 2004).

¹⁹ La capacité de ressuyage est la capacité d'évacuation de l'eau d'un sol (Labreuche et Métais, 2020).

sols étudiés (voir Tableau 2). De plus, même si les sols sableux sont moins sensibles au tassement, un taux de sable élevé associé à une forte teneur en limon pourrait les rendre très vulnérables au tassement (Dexter, 2004). Cela s'explique par le fait que l'arrangement des particules grossières de sable va laisser assez d'espaces, qui seront comblés facilement par les particules fines de limon. La teneur en matière organique du sol, qui a la capacité de réduire la compactibilité du sol et à augmenter son élasticité (European Commission, 2008), est plus faible pour le sol situé en Centre-Val de Loire. Cela semble donc cohérent que le nombre de jours disponibles pour le sol situé en Centre-Val de Loire soit inférieur au nombre de jours prédit pour les sols situés dans les deux autres régions.

Il se peut également que les règles de décisions appliquées pour accepter si un jour est disponible ou pas soit trop sévères, du fait que l'outil simule qu'il y aurait 0 jour disponible pour une année pour le sol situé en Picardie (2009) et deux années pour le sol situé en Centre-Val de Loire (2008 et 2019). Cela pourrait peut-être être dû à un climat trop humide ces années-ci, mais à dire d'expert, ces zones n'avaient pas de particularité climatique durant ces années.

Ces premiers résultats montrent que l'outil J-Distas semble pouvoir simuler de façon cohérente le nombre de jours disponibles pour réaliser la destruction de couvert dans de bonnes conditions agronomiques et sans risque de tassement. D'autres simulations doivent être réalisées sur d'autres opérations culturales et d'autres cultures pour vérifier sa pertinence. Il faut cependant souligner que dans cette étude les nombres de jours disponibles sont malgré tout surestimés, du fait que les règles de décisions sur l'aptitude à la dessiccation²⁰ du sol ne sont pas encore appliquées car non encore disponibles. Les règles de décisions pour définir les seuils acceptables pour qu'un jour soit disponible sont en effet de trois types : les règles de décisions sur i) la résistance du sol au tassement, ii) l'aptitude du sol à être travaillé (travaillabilité) et iii) l'aptitude à la dessiccation par rapport au climat. La prise en compte de ces dernières pourrait réduire les nombres de jours disponibles simulés.

²⁰ Diminution de la teneur en eau d'un volume de sol, in situ (par évaporation directe en surface, sous l'action des racines des plantes (Baize, 2004).

V.2. Choix du nombre de répétition : paramétrisation de l'analyse de sensibilité

Les résultats des simulations effectuées pour fixer le nombre de répétition en vue de réaliser l'analyse de sensibilité sans risque de biais montrent une large fluctuation à tous les niveaux choisis ($r = 5, 10, 20, 30, 50$) (Figure 28 à Figure 33). En effet, pour un nombre de répétitions inférieure à 30, une grande variabilité des indices de sensibilité μ^* et σ est observée pour les cinq variables d'entrée considérées pour les 3 types de sol, et ce quel que soit l'année de simulation. A partir de 30 voire 50 répétitions, les indices de sensibilité semblent montrer une certaine stabilité : ils continuent de varier mais dans une gamme plus faible. A l'exception de l'indice de sensibilité σ pour la pression de gonflage des roues arrière dans les 3 zones et des indices de μ^* et σ pour cette pression de gonflage et le coefficient de percolation qui continue à varier relativement fortement. Nous cherchons ici à partir de quel nombre de répétitions les indices de sensibilité de Morris se stabilisent pour que les résultats de l'analyse de sensibilité ne soient pas biaisés. Par exemple, si l'écart type des indices se stabilisait à partir de 10 répétitions, nous pourrions faire l'analyse de sensibilité avec r égal ou inférieur à 10 sans biais, car à partir de 10 répétitions nous aurions les mêmes résultats que pour un nombre des répétitions plus élevé.

Nous en déduisons qu'aucune stabilité des indices n'est donc observée pour un nombre de répétitions inférieure à 50.

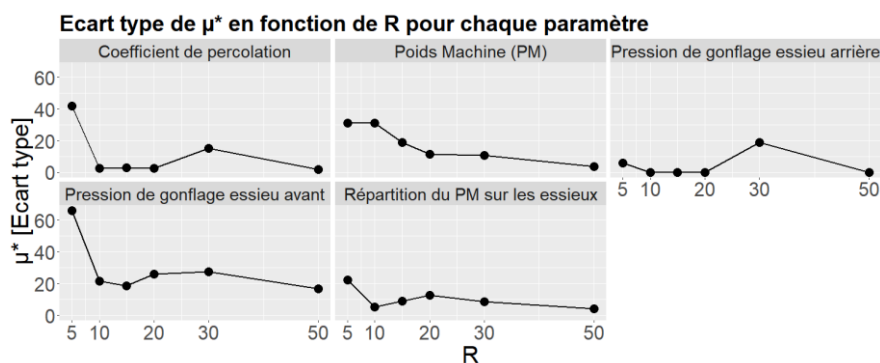


Figure 28 : Variation des écarts types de μ^* en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Île-de-France.

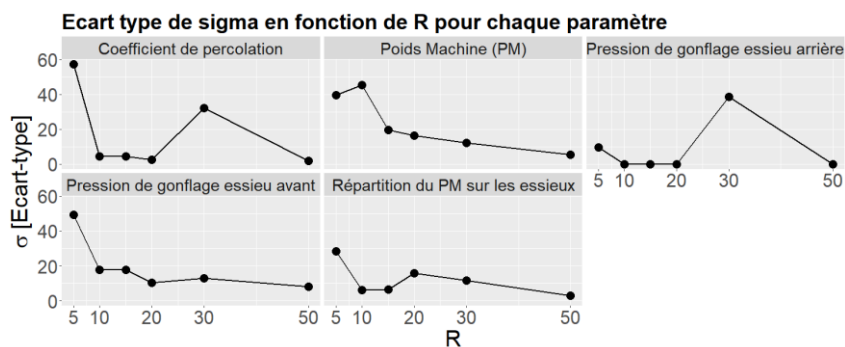


Figure 29 : Variation des écarts types de σ en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Île-de-France.

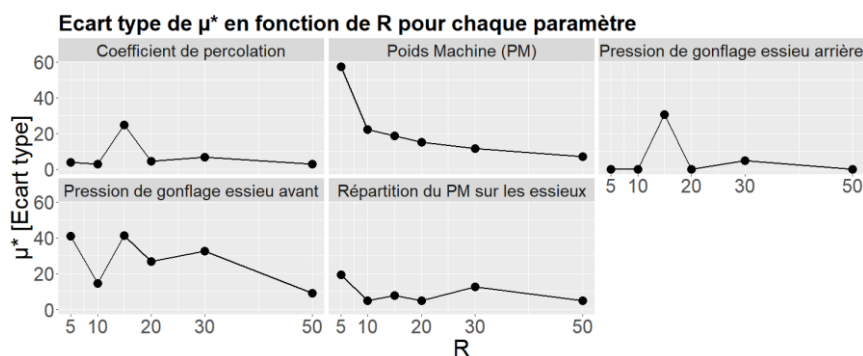


Figure 30 : Variation des écarts types de μ^* en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Picardie.

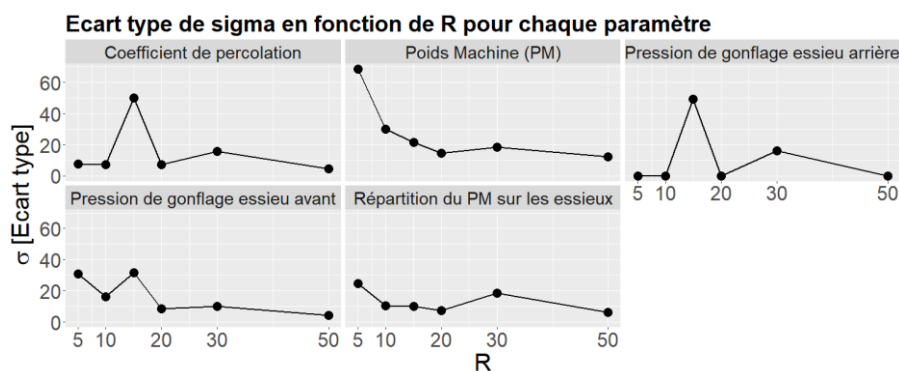


Figure 31 : Variation des écarts types de σ en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Picardie.

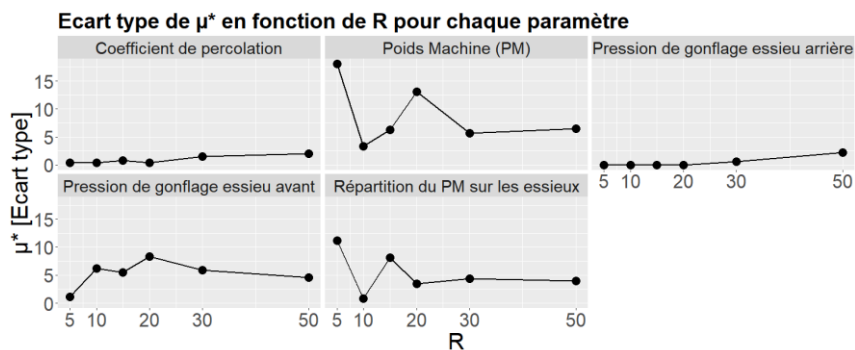


Figure 32 : Variation des écarts types de μ^* en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Centre-Val de Loire.

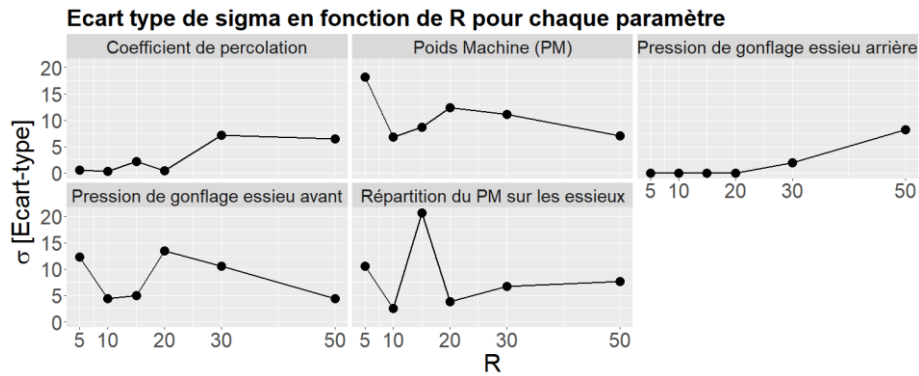


Figure 33 : Variation des écarts types de σ en fonction du nombre répétitions pour le type de sol situé en Centre-Val de Loire.

Nous pouvons retenir ici que pour un nombre de répétitions allant de 5 à 30 il n'y a pas stabilité des indices de sensibilité de Morris pour les cinq variables étudiées, quel que soit le type de sol considéré. Le nombre de répétitions ne dépend donc pas ici du type de sol, pour la gamme de variation des propriétés considérées. Ce qui signifie que les résultats sur l'analyse de sensibilité vont impérativement varier en fonction du nombre de répétition de 5 à 30. Il est donc nécessaire de fixer le nombre de répétitions le mieux possible pour éviter de biaiser les résultats. Pour des valeurs de r allant de 30 à 50 une certaine stabilité commence à apparaître. Nous avons également l'intention d'étudier des nombres de répétitions plus élevées que 50, mais les temps de calcul élevés nous ont obligés à considérer une valeur maximale de $r = 50$. Ce n'est cependant pas problématique en soit le nombre de simulation réalisables dépend du temps disponible pour réaliser les simulations, ce qui fait partie des critères de choix i) d'une méthode d'analyse de sensibilité en général et ii) des paramètres de l'analyse de sensibilité (y compris de choix du nombre de répétition) (Faivre et al., 2013). Le choix du nombre de répétitions est donc un compromis entre les temps de calcul et le biais accepté pour les résultats de l'analyse de sensibilité.

Dans notre cas, un nombre de répétition inférieur à 50 est à éviter pour prévenir le risque d'erreur qui pourrait biaiser les résultats de l'analyse de sensibilité. Des analyses de sensibilité pour des nombres de répétitions inférieurs à 30 ont été réalisées, mais nous avons réellement remarqué que des variables influentes apparaissaient non influentes ou peu influentes pour les niveaux de répétitions plus bas (résultats qui ne sont pas présentés dans cette étude). Même si les temps de calcul sont beaucoup plus longs si le nombre de répétitions est augmenté de 50 à 100 (de l'ordre de 6 jours supplémentaires pour 100 répétitions), nous avons fait le choix d'éviter au maximum le risque de biais des indices de sensibilité. Pour cette raison, nous avons choisi un nombre de répétitions de 100 pour réaliser l'analyse de sensibilité.

V.3. Résultat de l'analyse de sensibilité de Morris de l'outil J-Distas : influence des variables d'entrée sur le nombre de jours disponibles

Dans cette section, nous allons présenter l'influence de certaines variables d'entrée de l'outil J-Distas afin d'initier le processus d'évaluation de ce dernier. Les variables étudiées ont été choisies à dire d'expert et sont souvent reconnues comme influentes sur les autres outils et/ou modèles. Les réflexions vont se porter sur l'analyse de sensibilité de l'outil J-Distas en s'intéressant au nombre de jours disponibles du 1^e décembre de l'année n-1 au 31 mars de l'année n, pour réaliser les opérations dans de bonnes conditions agronomiques et sans risque de tassement. Pour des raisons de temps de calcul, l'analyse de sensibilité porte sur un seul environnement par type de sol (environnement type) et sur 3 ans (2019, 2020 et 2021) avec un plan de simulation à 100 répétitions. Les indices de sensibilité de Morris sont donc calculés en faisant la moyenne des 3 années, tout en considérant également l'étendue de variation des indices de sensibilité μ^* et σ pour les 3 années (valeurs minimales et maximales). Ces résultats vont permettre de déterminer les variables d'entrée de l'outil J-Distas ayant des effets élevés sur le nombre de jours simulés comme disponibles.

Globalement, les résultats de l'analyse de sensibilité de l'outil J-Distas pour les 3 types de sols ne montrent pas d'influence linéaire pour les 5 variables étudiées (Figure 23), c'est-à-dire que les variables d'entrée considérées n'influent pas de manière indépendante (sans interaction avec une autre variable) sur le nombre de jours disponibles simulés pour réaliser la destruction de couvert végétal. En effet, aucune des variables n'a un indice μ^* élevé pour un indice σ nul (Figure 34, Figure 35 et Figure 36).

Cela ne signifie cependant pas que les cinq variables d'entrée considérées ne sont pas influentes. Au contraire, plusieurs variables d'entrée se sont montrées très influentes (c'est seulement l'hypothèse de linéarité qui est exclue). Nous pouvons en effet observer qu'il y a des variables d'entrée qui ont des influences très élevées sur le nombre de jours disponibles simulés et sont en interaction avec au moins une autre variable de l'outil (i.e. μ^* élevé et σ élevé simultanément). Les variables qui exercent ces influences fortes sur le nombre de jours disponibles sont (Figure 34, Figure 35 et Figure 36) :

- La pression de gonflage des roues avant de la machine agricole.
- Le poids total de la machine.

- La répartition du poids de la machine sur les roues.

Pour les gammes de variation choisies, la pression de gonflage des roues arrière (0.4 bars à 2.7 bars) paraît toujours négligeable quel que soit l'environnement étudié dans cette analyse de sensibilité. Elle est suivie du coefficient de percolation (gamme de variation de 0.32 à 0.9 pour les sols situés en Picardie et en Île-de-France et de 0.49 à 0.8 pour le sol situé en Centre-Val de Loire), qui présente une très faible influence dans les 3 environnements.

Il faut souligner que les valeurs de μ^* et de σ varient beaucoup plus en fonction de l'année considérée pour les variables influentes pour le sol situé en Centre-Val de Loire que pour les deux autres sols. Nous pouvons en effet voir que l'étendue des valeurs de μ^* et de σ varie de 0 à 21 jours et de 3 à 9 jours pour la pression de gonflage des roues avant, de 0 à 5 jours et de 3 à 9 jours pour le poids de la machine et de 0 à 3 jours et de 0 à 5 jours pour la répartition du poids de la machine sur les roues. De ce fait, les valeurs minimales des indices de sensibilité pour les 3 années montrent une non-influence totale des variables en Centre-Val-de-Loire (μ^* est proche de 0). Ceci est dû au fait que pour une des années considérées (2019) aucun jour disponible n'est prédit, quel que soit les valeurs des données d'entrée considérées dans l'analyse de sensibilité. Mais la présence d'interactions entre le poids total de la machine et la pression de gonflage des roues avant de la machine agricole reste visible. Il n'y a également que pour ce type de sol que l'effet d'interaction du poids total paraît faiblement plus élevé que la pression de gonflage des roues avant (σ plus élevé). Mais, cette dernière reste quand même plus influente car son indice μ^* est plus élevé.

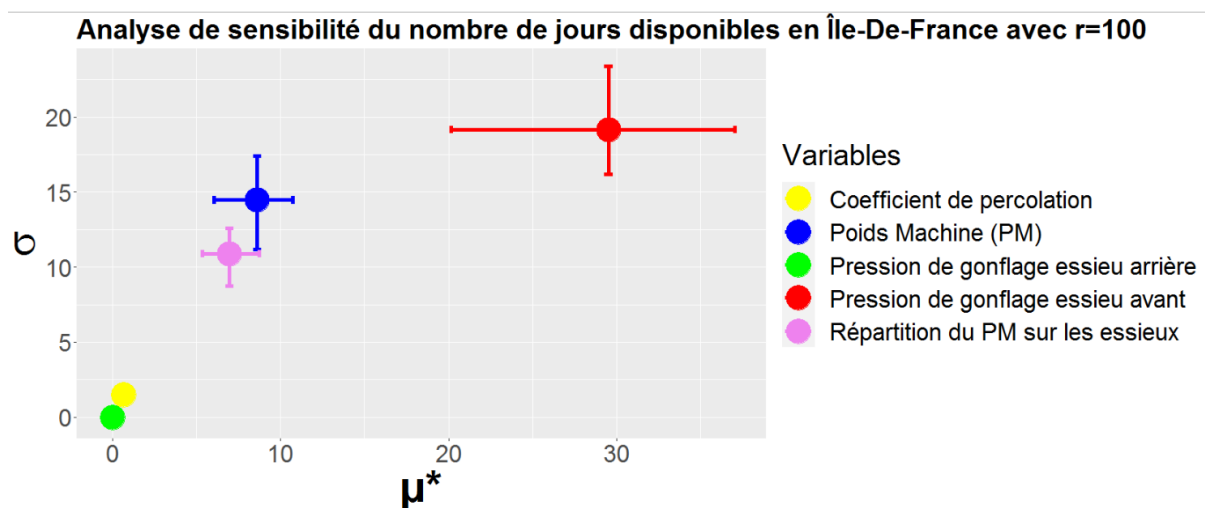


Figure 34 : Influence des variables d'entrée sur le nombre de Jours Disponibles en Île-de-France avec 100 répétitions. Les barres représentent l'étendue des valeurs minimale et maximale de μ^* et de σ sur les saisons 2019-2021 autour de la moyenne (point central).

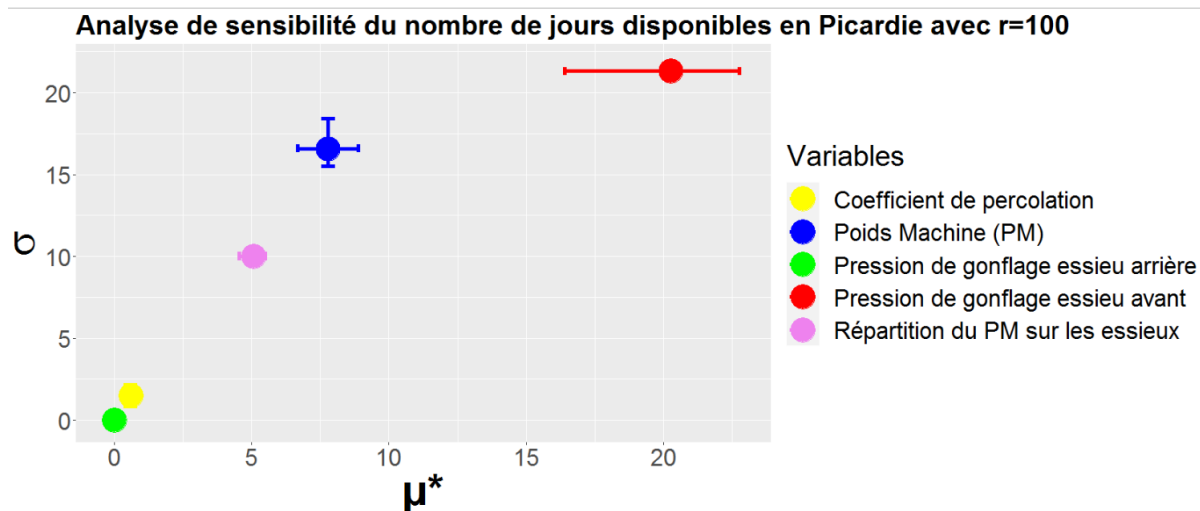


Figure 35 : Influence des variables d'entrée sur le nombre de Jours Disponibles en Picardie avec 100 répétitions. Les barres représentent l'étendu des valeurs minimale et maximale de μ^* et de σ sur les saisons 2019-2021 autour de la moyenne (point central).

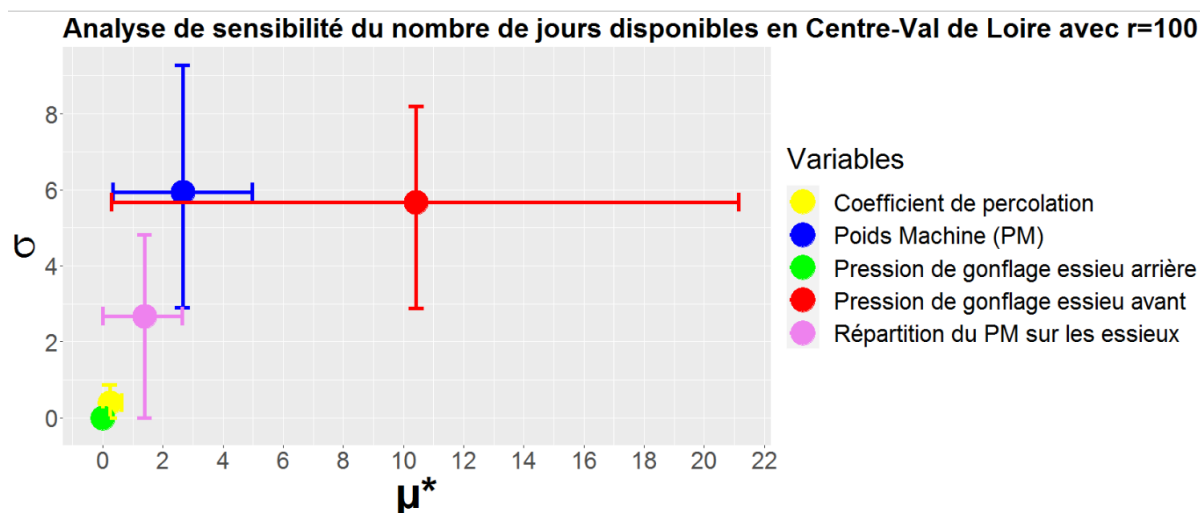


Figure 36 : Influence des variables d'entrée sur le nombre de Jours Disponibles en Centre-Val de Loire avec 100 répétitions. Les barres représentent l'étendu des valeurs minimale et maximale de μ^* et de σ sur les saisons 2019-2021 autour de la moyenne (point central).

Pour les trois types de sols étudiés, certaines variables se sont montrées très influentes (la pression de gonflage des roues avant, le poids de la machine, la répartition du poids de la machine) et aucune des variables n'a montré une influence autonome (influence linéaire) sur le nombre de jours disponibles pour détruire le couvert végétal avec une machine agricole, sinon des influences en interaction avec au moins une autre variable. Le coefficient de percolation du sol et de la pression de gonflage des roues arrière restent toujours peu influents sur les résultats de J-Distas dans les trois types de sol.

La non-influence de la pression de gonflage des roues arrière dans les trois types de sols pourrait s'expliquer par le fait que le tassement est surtout produit par les roues avant. Après le passage des roues avant, l'effet de la pression de gonflage des roues arrière pourrait être masqué. Cette hypothèse est soutenue par le fait que la pressions de gonflage des roues avant est la variable d'entrée la plus influente parmi celles considérées.

D'après Campolongo et al. (2007), l'indice de sensibilité μ^* permet de classer les variables par ordre d'importance. Le classement des variables d'entrée influentes par ordre décroissant est donc le suivant : la pression de gonflage des roues avant, le poids de la machine et la répartition du poids de la machine. Les variables d'entrée non influentes sont le coefficient de percolation du sol, dont l'effet pourrait être considéré comme négligeable, et la pression de gonflage des roues arrière qui n'affiche aucune influence pour la gamme de variation choisie. D'après les résultats obtenus, l'ordre d'importance des variables influentes ne change pas quel que soit l'environnement, malgré la variation de l'indice de sensibilité μ^* .

Nous devons retenir, en premier lieu, que la pression de gonflage des roues avant est une variable qui mérite beaucoup d'attention dans les entrées de l'outil J-Distas. En plus d'être très influente sur le nombre de jours disponibles, il semble aussi que son interaction avec la pression de gonflage des roues arrière masque l'effet de cette dernière. Normalement, l'influence d'une variable peut être négligeable, mais sa nullité sur la gamme de variations suscite des doutes. En second lieu, le poids de la machine et la répartition du poids de la machine méritent également une attention particulière puisque ce sont aussi des variables influentes, même si c'est à un moindre niveau.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans un contexte de changement global, aujourd'hui, il devient de plus en plus nécessaire de préserver les ressources naturelles. Le sol comme principale source de nourriture pour les hommes et comme ressource non renouvelable à l'échelle de vie humaine mérite d'être préservé pour ne pas mettre en péril l'avenir des prochaines générations. Sachant que le tassement des sols causé par le passage des engins agricoles dans les champs est l'une des principales sources de dégradation des sols. La détermination de « jours disponibles » ou favorables, c'est-à-dire des jours qui combinent la réussite des pratiques agricoles et la préservation des sols vis-à-vis du tassement, fait partie des mesures préventives contre le risque de tassement. Aujourd'hui il existe plusieurs outils qui peuvent simuler les deux enjeux séparément, mais aucun d'entre eux ne permet de les combiner. L'objectif principal du projet J-Distas est de fournir cet outil, qui pourrait aider les agriculteurs à faire des choix stratégiques. A cet effet, ce mémoire a pour but de calculer des jours disponibles pour une opération culturale bien déterminer (la destruction de couvert végétal dans cette étude) avec l'outil et d'évaluer l'influence de certaines variables d'entrées sur le nombre de jours simulé comme disponible. La technique utilisée pour mesurer cette influence est l'analyse de sensibilité qui permet de décrire l'incertitude dans les sorties d'un outil et/ou modèle et permet de hiérarchiser l'importance des différentes variables d'entrées incertaines. La recherche bibliographique et les connaissances des acteurs impliqués dans le projet ont permis de choisir la méthode d'analyse de sensibilité de Morris dans le cadre de cette étude.

Le travail réalisé dans cette étude a permis de répondre aux objectifs fixés. Les règles de décisions appliquées dans l'outil J-Distas ont montré qu'il y aurait des jours disponibles pour réaliser l'opération de destruction de couvert avec une machine agricole avant l'implantation du maïs de printemps. Ces nombres de jours sont calculés sur des données climatiques historiques de 2003 à 2021 dans 3 types de sols différents.

Pour un même type de sol, les environnements (scenarii de simulations avec une faible variation des propriétés du sol) n'ont montré aucun impact sur le nombre de jours disponibles. Cependant, des variations inter-annuelles sont observées montrant l'impact du climat. Des variations du nombre de jours disponibles sont somme toute observées entre les différents types de sol montrant l'impact du type de sol sur le nombre de jours disponibles.

En ce qui concerne l'analyse de sensibilité, les résultats ont montré aucun impact individuel des variables d'entrée. En revanche, des variables comme la pression de gonflage des roues avant,

le poids de la machine et la répartition du poids de la machine sur les roues se sont montrées très influentes avec la présence d'interaction. Elles sont donc les variables les plus importantes, qui méritent une attention particulière dans la définition des valeurs des variables d'entrées lors de l'utilisation de l'outil J-Distas surtout la pression de gonflage des roues avant et le poids de la machine. Le coefficient de percolation et la pression de gonflage des roues arrière pourraient être fixés avec confiance à n'importe quelle valeur de la gamme de variation étudiée, car leurs effets restent toujours négligeables. Ces variables d'entrée pourraient être écartées pour éviter d'alourdir les calculs dans la perspective de l'utilisation d'une autre méthode d'analyse de sensibilité plus coûteuse en termes de temps de calcul.

En perspective :

- Dans les prochaines études, il faudrait choisir uniquement des sites expérimentaux dans des zones pour lesquelles nous disposons de connaissances sur les jours disponibles et les risques de tassement, ce qui pourrait permettre de mieux juger les résultats de sorties.
- Il faudra faire d'autres simulations, pour différencier l'impact du climat et du type de sol, et sur d'autres opérations et d'autres cultures pour vérifier la pertinence des nombres de jours disponibles simulés par l'outil J-Distas.
- La méthode de sensibilité de Morris permet d'estimer la présence d'interactions entre des variables, mais ne donne pas de détails sur la nature de ces interactions (n'indique pas avec quelles autres variables). Pour aller plus loin, il faudrait donc utiliser une autre méthode, comme Sobol par exemple, permettant de connaître la nature de ces interactions.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Ben Romdhane, S. (2016). Modèles de simulation « Jours Disponibles » : état des lieux et attentes des agriculteurs et conseillers. Mémoire de Master 2. Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier - Université Paul Valéry de Montpellier III. p. 51.

Benamou, N. (2018). « Recherche technologique pour la compétitivité et la durabilité des filières de la production à la transformation ». Document Appel à projets du projet J-Distas. Arvalis. France. p.28.

Bennetzen, E.H. (2016). Soil compaction effects on crop yield (in Danish). In Pedersen, J.B. (Ed.), Oversigt over Landsforsøgene 2016. Report from The Danish Agriculture & Food Council. pp. 259-260. ISBN 978-87-93051-00-3.

Bessard Duparc, P. et Soenen, B. (2017). Aides à la décision : Vers une déclinaison au quotidien du modèle CHN. Arvalis. Perspectives Agricoles, 446, pp. 57-60.

Brun, D. et Labreuche, J. (2020). Opter pour la technique de destruction des couverts la plus appropriée. Arvalis Info. URL : <https://www.arvalis-infos.fr/opter-pour-la-technique-de-destruction-des-couverts-la-plus-appropriee-@/view-11589-arvarticle.html>.

Brunotte, J., Nolting, K., Fröba, N. and Ortmeier, B. (2012). Soil protection and tillage: how high is the wheel load in the plough furrow? (in German with English summary). Landtechn, 67, pp.265–269.

Byé P. (1979). Mécanisation de l'agriculture et industrie du machinisme agricole : le cas du marché français. In: Économie rurale, 130, pp. 46-59.

Cacuci, D. (2003). Sensitivity and Uncertainty Analysis, Volume 1: Theory. Chapman and Hall.

Campolongo, F., Cariboni, J. et Saltelli, A (2007). « An Effective Screening Design for Sensitivity Analysis of Large Models ». Environmental Modelling & Software, Modelling, computer-assisted simulations, and mapping of dangerous phenomena for hazard assessment, 22 (10), pp.1509-18. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.10.004>.

Christian, G. (2014). Le tassement du sol, une affaire sérieuse. Réussir grandes cultures, 285, pp.38-40

Denis, B. (2004). Petit lexique de pédologie. INRA Editions. Collection Dictionnaires. p.271. 2-7380-1114-4.

Dominati, E., Patterson, M. et Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. Ecological Economics, 69, pp.1858-1868.

European Commission. (2008). Natural susceptibility to soil compaction in Europe. European Soil Data Centre (ESDAC). URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-susceptibility-compaction>.

Faivre, R., Iooss, B., Mahévas, S., David Makowski, D. et Herve Monod, H. (2013). Analyse de sensibilité et exploration de modèles : Application aux sciences de la nature et de l'environnement. Collection Savoir-Faire. Editions Quae. p.352. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173750>.

FAO. (1996). Sommet mondial de l'alimentation : Les leçons de la révolution verte vers une nouvelle révolution verte. 13-17 novembre 1996 Rome Italie. <https://www.fao.org/3/w2612f/w2612f6a.htm>.

FAO. (2020). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2020. Relever le défi de l'eau dans l'agriculture. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb1447fr>.

Graves, A.R., Morris, J., Deeks, L.K., Rickson, R.J., Kibblewhite, M.G., et al. (2015). The total costs of soil degradation in England and Wales. *Ecological Economics*, 119, issue C. pp399-413. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:ecolec:v:119:y:2015:i:c:p:399-413>.

Houskova, B. (2004). Soil compaction as a driving force for changes in soil functions. Summer School of Soil Survery, 12-16 juin 2004.

Iooss, B. et Lemaître, P. (2015). A Review on Global Sensitivity Analysis Methods. In: Dellino G., Meloni C. (eds) *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems*. Operations Research/Computer Science Interfaces Series, 59, Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7547-8_5.

Ishigami, T. et Homma, T. (1989). An importance quantification technique in uncertainty analysis for computer models. Report JAERIM 89-111, Japan Atomic Energy Research Institute.

ITB. (2014). La technique betteravière. Perfbet : un outil pour améliorer la performance des chantiers de récolte, 1013, p.4.

Keller T., Lamandé, M., Arvidsson J., Berli M., Ruiz S., et al. (2014). Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: comparing measurements with simulations. *Soil Tillage Research*, 140, pp.106-117.

Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. et Or, D. (2019). « Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning ». *Soil and Tillage Research* 194: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>.

Laberdesque, M., Bessard Duparc, P., Soenen, B., Métais, P., Trochard, R., Le Bris, X. (2017). CHN: practical case of valorization of a dynamic crop model to estimate the number of available days for cultivation works.

Labreuche, J. et Métais, P. (2020). Attendre le ressuyage des sols en profondeur avant d'intervenir. Arvalis.info. ARVALIS Institut du végétal. Disponible en ligne : <https://www.arvalis-infos.fr/attendre-le-ressuyage-des-sols-en-profondeur-avant-d-intervenir-@/view-31970-arvarticle.html>.

Lacoste et Métais (2021). Définition des règles de décision appliquée dans l'outil J-Distas.

Lassen, P., Lamandé, M., Stettler, M., Keller, T., Jørgensen, M.S. et al. (2013). Terranimo: A soil compaction model with internationally compatible input options. EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation". Turin. Italy 24-27 June 2013.

Lefebvre, M.P. (2010). Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France. Thèse. Université d'Orléans. p.290.

Lozet, J. et Mathieu C. (1997). Dictionnaire de science du sol. TEC & DOC Lavoisier. Paris.

Malenfant, C. (2016). Analyse de sensibilité d'un multimodèle hydrologique. Mémoire en Maîtrise en génie des eaux. Québec, Canada.p88.

Métais, P. (2019). Tassements du sol : de la prévention à la correction. Arvalis.info. ARVALIS - Institut du végétal. Disponible en ligne : <https://www.arvalis-infos.fr/tassement-du-sol-de-la-prevention-a-la-correction-@/view-31362-arvarticle.html>.

Métais, P., Duparc, P.B., Trochard, R. et Soenen. B. (2018). « Estimation of available days for cultivation work: evaluation of J-Dispo tool using CHN dynamic crop model ».

Müller, L., Lipiec, J., Kornecki, T. S., et Gebhardt, S. (2011). Trafficability and workability of soils. In *Encyclopedia of agrophysics*. pp. 912–924. Springer. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3585-1_176.

Obour, P. B., Lamandé, M., Edwards, G., Sørensen, C. G., et Munkholm, L. J. (2017). Predicting soil workability and fragmentation in tillage: a review. *Soil Use and Management*, 33(2), pp.288-298. <https://doi.org/10.1111/sum.12340>.

Oldeman L.R., Kakkeling R.T.A., Sombroek W.G. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation, an explanatory note. ISRIC, Wageningen, Pays-Bas. p34.

Pappenberger, F., Ratto, M. et Vandenberghe, V. (2010). Review of sensitivity analysis methods. In P.A. Vanrolleghem, editor, *Modelling aspects of water framework directive implementation*, pp.191–265. IWA Publishing.

Pichlmaier, B., Honzek, R. (2011). Traktion Management for Large Tractors (in German With English Summary). *ATZ offhighway*, Springer Automotive Media, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Germany. pp. 84–94. doi: 10.1365/s35746-011- 0023-x.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

Rabitz H. (1989). Systems analysis at the molecular scale. *Science*, 246(4927), pp.221-226. doi: 10.1126/science.246.4927.221. PMID : 17839016.

Rabitz, H., Alis, O.F., Shorter, J. et Shim, K. (1999). Efficient input output model representations. *Computer Physics Communications*, 117, pp.11–20.

Reboul, C., et Maamoun, M. (1983). Contraintes météorologiques du travail agricole. Jours disponibles pour les travaux des champs en Ile-de-de France. *Économie rurale*, 157(1), pp.83-95. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1983.3000>.

Retureau, P., Noël, V. (2011). Assolement en commun Travailler ensemble pour réduire les charges. *Perspectives Agricoles*, 382, pp.4-7.

Richard, G. (2008). Le projet GESSOL DST : dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement. Rapport final de contract GESSOL. MEDDT. p.50.

Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A. et Guerif, J. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52, pp.49-58.

Saltelli, A. (2000). *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, Ltd.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D. et al. (2008). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons, Ltd.

Saltelli, A., S, Tarantola et Chan, K. (1999). Quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*, 41(1), pp 39–56.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., et Ratto, M. (2004). Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models. Wiley.

Schjønning, P., Lamandé et M. (2018). Models prediction of soil precompression stress from readily available soil properties. *Geoderma*, 320, pp.115-125.

Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M. et al. (2015). Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction: A European Perspective. In *Advances in agronomy*. First edition (ed. D.L. Sparks). Academic Press. Amsterdam, Netherlands. pp. 183–237.

Sobol, I.M. (1993). Sensitivity estimates for non linear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 1 :407–414.

Soenen, B., Le Bris, X., Cohan, J.P., Le Souder, C. (2015). Premières valorisations agronomiques du modèle de culture « CHN ». Conference: Rencontres COMIFER-GEMAS 2015. https://www.researchgate.net/publication/290086495_Premieres_valorisations_agronomiques_du_model_de_culture_CHN

Stettler, M., Keller, T., Schjønning, P., Lamande, M., Lassen, P., Pedersen, J., et al. (2010). Terranimo - a web-based tool for assessment of the risk of soil compaction due to agricultural field traffic.

Tarantola, S., Gatelli, D. et T. Mara. (2006). Random balance designs for the estimation of first order global sensitivity indices. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, pp.717–727.

Ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., et al. (2019). The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks.

Tilman, D. (1998). The greening of the green revolution (Le verdissement de la révolution verte). *Nature*. 396:211-212. DOI10.1038/24254

Turányi, T. (1990). Sensitivity analysis of complex kinetic systems. Tools and applications. *Journal of Mathematical Chemistry* 5(3). p. 203 -248.

Van der Sluijs, J.P. (2002). A way out of the credibility crisis of models used in integrated environmental assessment, *Futures*, 34, pp.133–146.

Vincent, T. (2020). Prévenir le tassement du sol pour éviter les pertes économiques. *AgroTransfert. Réussir grandes cultures*, 351, pp.28-30.

Voorhees, W.B. (2000). Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. In: Horn, R. van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. (Eds.), *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences*, *Adv. GeoEcol.* 32, pp.331-338.

ANNEXES

Annexe 1. Coefficient de percolation utilisé chez Arvalis

Tableau A 1. Coefficient de percolation utilisé chez Arvalis.

Vitesse de ressuyage	Nombre de jours	Type de sol	Coefficient de percolation (CP)
Ressuyage très rapide	1	sable pur	
	2	craie, argilo-calcaire caillouteux, graviers	0.9
Ressuyage rapide	3	limons sableux sain	0.8
	4	Argilo-calcaire profond, limon argileux	0.65
Ressuyage assez lent	5	limond profond, sol argileux sain	0.56
	6	Limon hydromorphe, limon sableux hydromorphe	0.49
Ressuyage lent	7	argile hydromorphe	0.43
	8		0.39
Ressuyage très lent	9		0.35
	10	Marais argileux	0.32

Source : Arvalis

Annexe 2 : Effet du tassement des sols sur la croissance du maïs.



Figure A 1 : Effet du tassement des sols sur la taille des racines et de épis de maïs (Houskova, 2004).

Annexe 3. Classification des textures de sols

Les triangles de texture des sols ont été construit sur le logiciel R en se basant sur le sur le triangle de texture de l'Aisne, la plus utilisée en France.

Les carrés de la figure de gauche symbolise le sol de Centre-Val de Loire, les croix symbolise celui d'Île-de-France et les ronds symbolise celui de Picardie. Et la figure de droite représente la répartition de la matière pour chaque type de sol. De même sur cette figure le cercle blanc symbolise le sol de Centre-Val de Loire, le cercle rouge symbolise celui d'Île-de-France et le cercle jaune symbolise celui de Picardie.

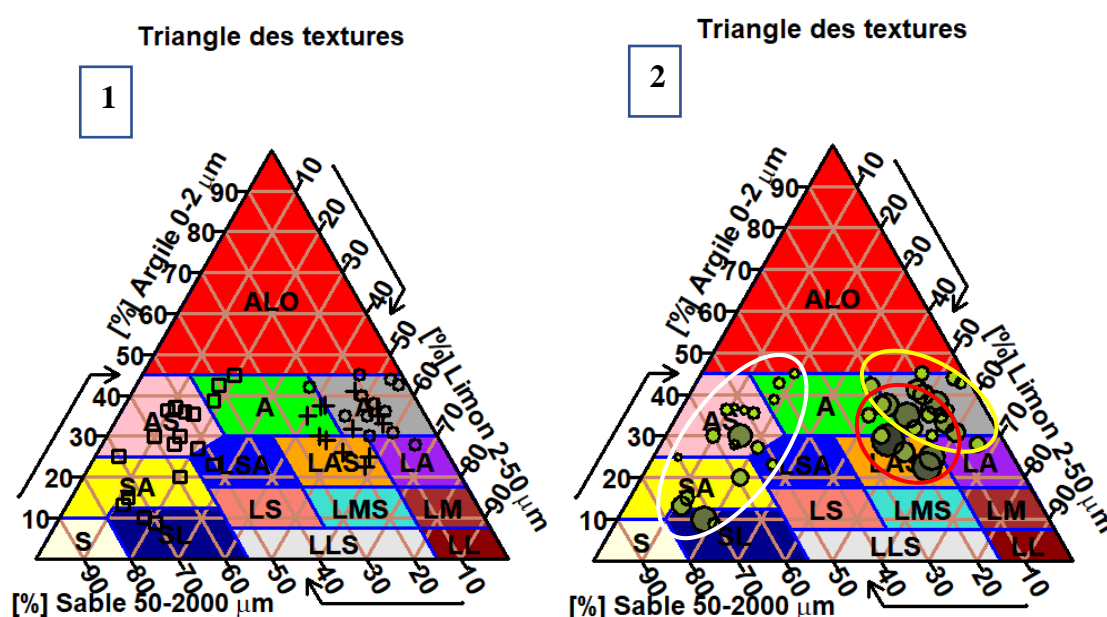


Figure A 2 : Texture des sols.

Le tableau ci-dessous donne la définition des codes de texture inclus dans la Figure A 2.

Tableau A 2 : Signification des codes de texture.

Numéro	Code	Nom
1	ALO	Argile lourde
2	A	Argile
3	AL	Argile limoneuse
4	AS	Argile sableuse
5	LA	Limon argileux
6	LAS	Limon argilo-sableux
7	LSA	Limon sablo-argileux

8	SA	Sable argileux
9	LM	Limon moyen
10	LMS	Limon moyen sableux
11	LS	Limon sableux
12	SL	Sable limoneux
13	S	Sable
14	LL	Limon léger
15	LLS	Limon léger sableux

Annexe 4. Variation des proportions de la texture et de la matière organique

Tableau A 3 : Proportions de la texture et de la matière organique des types de sols.

		Variation des proportions en %			
Région	Valeur	Argile	Limon	Sable	Matière Organique
Centre-Val de Loire	Minimale	8.80	5.00	35.60	0.00
	Moyenne	26.9	15.24	55.3	1.5
	Maximale	45.00	25.48	75.00	3.00
Ile-De- France	Minimale	28.00	35.50	2.00	0.50
	Moyenne	36.5	50.25	11.50	1.75
	Maximale	45.00	65.00	21.00	3.00
Picardie	Minimale	22.50	39.00	10	1
	Moyenne	31.75	47	17.50	2.5
	Maximale	41.00	55.00	25.00	4.00

Annexe 5. Exemple de combinaison pour 5 répétitions

Tableau A4 : Exemple de combinaison pour 5 répétitions pour les 5 variables (30 combinaisons).

No	Coefficient de percolation	Poids machine (PM)	Coefficient de variation de la répartition du PM sur les essieux	Pression de gonflage roues avant	Pression de gonflage roues arrière
1	0.63	24906.11	0.36	1.60	1.42
2	0.63	14436.67	0.36	1.60	1.42
3	0.63	14436.67	0.36	1.04	1.42
4	0.80	14436.67	0.36	1.04	1.42
5	0.80	14436.67	0.42	1.04	1.42
6	0.80	14436.67	0.42	1.04	2.70
7	0.66	20718.33	0.39	0.71	2.19

8	0.66	20718.33	0.39	1.27	2.19
9	0.49	20718.33	0.39	1.27	2.19
10	0.49	20718.33	0.39	1.27	0.91
11	0.49	20718.33	0.45	1.27	0.91
12	0.49	10248.89	0.45	1.27	0.91
13	0.73	12342.78	0.37	1.38	1.93
14	0.56	12342.78	0.37	1.38	1.93
15	0.56	12342.78	0.37	0.82	1.93
16	0.56	12342.78	0.37	0.82	0.66
17	0.56	22812.22	0.37	0.82	0.66
18	0.56	22812.22	0.43	0.82	0.66
19	0.49	8155.00	0.39	0.60	1.42
20	0.49	8155.00	0.39	0.60	2.70
21	0.49	8155.00	0.45	0.60	2.70
22	0.49	18624.44	0.45	0.60	2.70
23	0.49	18624.44	0.45	1.16	2.70
24	0.66	18624.44	0.45	1.16	2.70
25	0.52	27000.00	0.36	1.60	1.93
26	0.52	27000.00	0.42	1.60	1.93
27	0.70	27000.00	0.42	1.60	1.93
28	0.70	16530.56	0.42	1.60	1.93
29	0.70	16530.56	0.42	1.60	0.66
30	0.70	16530.56	0.42	1.04	0.66

Annexe 6. Données de bases pour les sites étudiés dans les simulations

Tableau A 5 : Données de base pour les sites étudiés.

Région	Profondeur en Cm	Site_lat itude	Site_longitude	CP	Horiz on	Epaisseur en Cm	Valeurs	Argile en %	Limon fin en %	Limon grossier en %	Sable fin en %	Sable grossier en %	M. O
Île-de-France	90	48.33	2.38	0.65	H1	25	Min	25	15	10	1	1	1
					H2	65	Min	28	25	25	1	1	0.5
					H1	25	Moy	30.9	30	28.1	3.3	5.8	1.9
					H2	65	Moy	36	29	26	4.3	3.8	0.9
					H1	25	Max	45	35	30	10	25	3
					H2	65	Max	45	35	30	10	10	1.3
Centre-Val de Loire	110	46.67	1.11	0.49	H1	30.0	Min	17	5	5	15	35	1.8
					H2	15.0	Min	25	4	1	10	30	0
					H3	65.0	Min	45	10	1	5	9	0
					H1	30.0	Moy	8.8	14.7	5.34	23.8	46.6	0.76
					H2	15.0	Moy	23	14.5	10.98	20.4	30.6	0.52
					H3	65.0	Moy	35.4	10.5	4.46	14.1	34.9	0.64
					H1	30.0	Max	35	15	10	25	80	3
					H2	15.0	Max	50	15	10	25	60	1
Picardie	80	49.86	3.03	0.65	H1	20	Min	18	15	15	5	5	1
					H2	60	Min	18	15	15	5	5	1
					H1	20	Moy	29	14	29	9	15	4
					H2	60	Moy	30	15	28.5	10	15	1.5
					H1	20	Max	45	35	35	15	15	2
					H2	60	Max	45	35	35	15	15	2

Annexe 7. Règles de décision appliquée pour les jours disponibles

A partir de ces décisions des conclusions sont tirées pour dire si un jour est disponible pour réaliser une intervention culturale dans un champ avec une machine agricole.

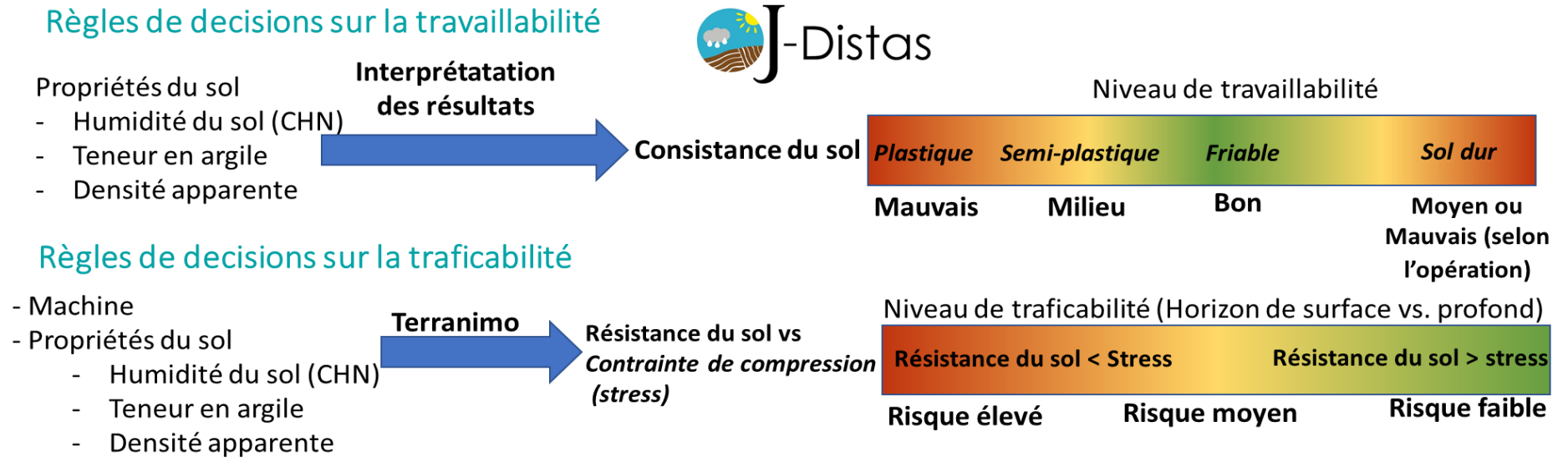


Figure A 3 : Règles de décision appliquée dans J-Distas.

