

Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires

Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques

8. Simulation de la levée des cultures intermédiaires avec le modèle "SIMPLE"

Auteurs :

Eric Justes

Julie Constantin

Carolyne Dürr

avec la participation de Thomas Henry
(stagiaire Ecole Ingénieurs de Purpan)

Juin 2012

Sommaire

8.1. Introduction et objectifs	293
8.2. Principes généraux des simulations avec le modèle SIMPLE	293
8.2.1. Description du modèle SIMPLE	293
8.2.2. Les entrées	295
8.2.3. Les sorties	296
8.3. Plan de simulation	296
8.3.1. Les sites climatiques étudiés	296
8.3.2. Les espèces	297
8.3.3. Les dates de semis	298
8.3.4. L'état structural du sol et les profondeurs de semis	298
8.3.5. Résumé des simulations effectuées	300
8.4. Résultats	301
8.4.1. Caractéristiques climatiques des sites et du lit de semences	301
8.4.2. Variation des taux de germination	303
8.4.3. Variations des taux et de la durée de la levée simulés	304
8.4.4. Analyse des causes de non-levée	310
8.5. Synthèse et conclusion	312
Références bibliographiques citées	314

Relecteur externe du chapitre : Jean-Noël Aubertot.

8.1. Introduction et objectifs

L'implantation des cultures intermédiaires est une étape essentielle : elle doit être rapide, et efficace pour que le couvert se développe et assure son rôle au niveau de la limitation de l'érosion et du piégeage d'azote. Lors de l'implantation des CIPAN, la levée de mauvaises herbes peut aussi être favorisée, ce qui peut contribuer à leur destruction avant la culture suivante. Cependant, le couvert de la CIPAN doit se mettre en place très rapidement pour les étouffer et ne pas être concurrencé, ce qui nuirait à la réalisation de ses autres fonctions. Ainsi, une étude plus approfondie des variations des vitesses et taux de germination et levée de ces cultures est nécessaire, car le déroulement de ces premières étapes du développement peut induire des variations importantes de croissance ultérieure de la CIPAN.

Plusieurs facteurs et conditions influencent ce déroulement. Les caractéristiques physiques et chimiques du sol, le climat, les différences entre espèces cultivées, les dates et densités de semis ainsi que les techniques de semis influencent largement le développement de la culture.

Les simulations réalisées avec le modèle STICS ont pour variables d'entrée la densité de plantes levées et la date de réalisation de 80% de levée. Le modèle STICS permet de simuler la date et le taux de levée pour une seule profondeur moyenne de positionnement des graines. Il prend en compte l'effet de la température et de l'humidité du sol, mais pas de l'état structural. Compte tenu de l'importance de cette phase d'implantation pour la réussite du développement des couverts de CIPAN, nous avons choisi de réaliser une analyse de sensibilité des résultats de la levée aux variations de conditions climatiques et à l'état structural du sol, au moyen d'un modèle spécifiquement dédié à cette phase de développement, le modèle SIMPLE. Ce modèle permet la simulation des taux et des vitesses de germination et de levée en prenant en compte la répartition des graines dans le lit de semences, l'état structural de celui-ci au semis, et les variations journalières après semis de température et de teneur en eau du sol, et d'état structural de surface.

L'objectif de ce travail de simulation est d'estimer la fréquence de conditions favorables ou défavorables à l'implantation des CIPAN pour différentes espèces, modes de semis et conditions pédoclimatiques.

Les résultats de cette analyse de sensibilité avec le modèle SIMPLE permettent d'évaluer les chances de succès de cette phase de développement et les densités de plantes levées qui pourraient être utilisées pour initialiser le modèle de culture STICS. Le modèle STICS sera utilisé pour simuler la croissance de la CIPAN post-levée, ainsi que les bilans dynamiques en eau, azote et carbone.

8.2. Principes généraux des simulations avec le modèle SIMPLE

8.2.1. Description du modèle SIMPLE

SIMPLE (SIMulation of PLant Emergence, Dürri et al., 2001) est un modèle, se présentant sous la forme d'un logiciel, qui permet d'effectuer des simulations des germinations et des levées de différentes cultures. Le modèle permet de prévoir un taux ainsi qu'une vitesse de germination et de levée. Ses variables d'entrée (Figure 8-1) sont de trois types : celles qui caractérisent les espèces étudiées, celles définissant les conditions environnementales dans le lit de semences (température et teneur en eau) et celles définissant le résultat du travail du sol et du passage du semoir dans un sol donné (taille et organisation spatiale des agrégats, positionnement des semences). Les conditions de milieu prises en compte dans ces prévisions sont donc les variations de température (temps thermique) et de teneur en eau dans le lit de semences, l'état structural du sol et son évolution de surface sous l'effet des pluies (battance). Ce modèle permet l'analyse des effets du travail du sol et des techniques de semis sur la levée.

Processus simulés par SIMPLE

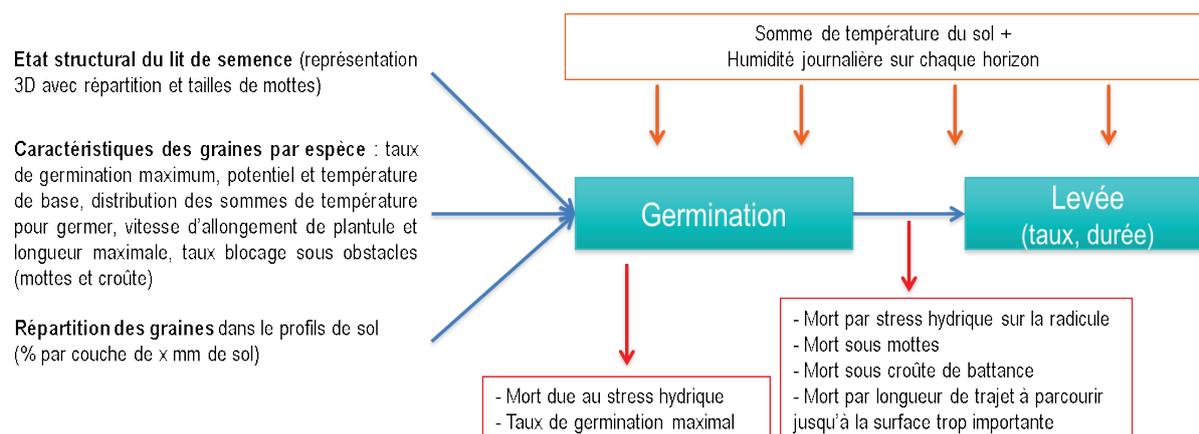


Figure 8-1. Représentation simplifiée du fonctionnement du modèle SIMPLE

La germination (percée de la racicule hors de la graine) et la levée (émergence de la plantule hors du sol) sont calculées graine par graine, ce qui permet de simuler la dynamique de la levée pour l'ensemble des graines semées. Ce modèle est de type stochastique, certaines caractéristiques des graines, leur profondeur de semis et l'arrangement spatial des agrégats de différentes tailles étant tirées au sort dans des distributions caractérisant le lot de semences et l'état du lit de semences. Cela permet de prendre en compte le fait que toutes les graines ne germent pas à la même vitesse, ne sont pas placées à la même profondeur et donc dans les mêmes conditions de milieu, et les interactions entre ces différents effets. Chaque simulation est réalisée en simulant le devenir de 1000 graines semées et en procédant à ces différents tirages au sort. La réalisation d'une simulation ne prend que quelques secondes. C'est la préparation des jeux de données (maquette de lit de semences, températures et teneurs en eau du sol journalières sur plusieurs mois pour plusieurs années ; caractérisation au laboratoire des différentes espèces, variétés et lots de semences) qui peut prendre du temps. Mais cela permet de constituer une base de données "milieux et espèces" qui peut ensuite être valorisée pour différentes études.

La germination dépend des conditions hydriques et thermiques dans la couche de sol où se situe la graine. En deçà des valeurs seuils de potentiel hydrique et température propres à l'espèce, la germination de la graine est stoppée. Au terme d'un nombre donné de jours après semis (en général 30 jours), les semences non germées sont considérées comme "mortes" et leur probabilité de levée est donc nulle.

Les graines sont réparties dans les différentes couches par tirage au sort dans une distribution des profondeurs auxquelles se répartissent les semences. Cette distribution dépend du type de travail du sol et du semoir utilisés.

Si la germination se réalise, la plantule croît jusqu'à percer hors du sol. Plusieurs raisons peuvent cependant entraîner la non-levée (mort) au-delà de la non-germination : i) mort de la plantule en relation avec le stress hydrique éventuellement subi par la racine au début de son allongement après germination, ii) blocage sous motte, iii) blocage sous croûte de battance, iv) longueur de la plantule insuffisante pour effectuer le trajet à parcourir jusqu'à la surface.

L'état structural du lit de semences est représenté à partir de maquettes 3D de lits de semences, qui prennent en compte la taille et la répartition des agrégats dans l'épaisseur de sol considérée (en général une dizaine de centimètres) et à sa surface. La plantule s'allonge à partir de sa profondeur de semis. Une fonction prévoit la mort de la plantule par stress hydrique au début de l'allongement de la racine. Lors de sa croissance vers la surface, la plantule peut rencontrer des mottes. Cela augmente le trajet à parcourir par la plante, et par ailleurs, la plante peut rester bloquée sous ces mottes, avec une probabilité qui dépend de l'espèce. Un module prévoit les risques de formation de croûte à la surface du sol, en tenant compte de la pluviométrie depuis le semis. Si une croûte est formée au moment où les plantes arrivent à la surface, l'humidité de la croûte est estimée et cela détermine la proportion de plantules pouvant la franchir ($P=1$ si humide, $P < 1$ si sèche). Les autres plantules restent bloquées et l'état de surface est à nouveau scruté le jour suivant. Si une plantule n'a pas émergé au bout

d'un temps thermique de 175°Cj (cumulés en tenant compte de la température de base de l'espèce) après sa germination, elle est considérée comme morte.

Les résultats de germination et levée obtenus reposent sur la simulation du devenir d'un nombre donné de graines semées, dont les caractéristiques sont tirées au sort dans différentes distributions (profondeur de semis, vitesse de germination, probabilité de mort sous obstacles). Le nombre retenu est souvent de 1000 graines (c'est le cas dans cette étude), afin de réaliser une simulation de cinétique de levée représentative des diverses interactions intervenant dans chaque tirage au sort, et aboutissant au résultat de levée obtenu pour un lit de semences donné et pour des dynamiques de température et de teneur en eau données.

In fine, le modèle simule un taux de germination et un taux de levée, ainsi qu'une vitesse de germination et de levée, pour chacun des scénarios étudiés, et les différentes causes de mortalité ayant abouti au taux de levée simulé sont récapitulées.

Domaine de validité du modèle SIMPLE

Il est important de noter trois limites à ces simulations. Tout d'abord, les graines sont considérées comme suffisamment en contact avec le sol pour pouvoir germer lorsque l'humidité du sol est supérieure au potentiel hydrique de germination de la graine permettant l'imbibition de la graine ; les situations de mauvais contact terre-graine (sols "creux") ne sont pas simulées. De la même façon, l'impact de températures très élevées (> 25°C de température moyenne, ou encore de températures maximales supérieures à 38°C qui empêchent la germination) n'est pas pris en compte dans ces simulations réalisées avec le modèle SIMPLE. Enfin, il faut souligner que les effets de stress de type biotique (maladies et ravageurs) sur le taux de levée ne sont pas simulés par ce modèle. Ce point est d'une manière générale mal renseigné, y compris dans la littérature et les documents techniques. En conséquence, l'impact des facteurs limitants biotiques reste difficile à estimer.

8.2.2. Les entrées

Les différentes données nécessaires à une simulation sont placées dans différents dossiers où se trouvent les fichiers nécessaires (ces fichiers sont sous la forme de fichiers texte ASCII).

Les fichiers "Climats"

Les fichiers d'entrée (dossiers) représentent les conditions environnementales dans le lit de semences pour un site, un sol, une année et une date de semis. Ces fichiers regroupent la pluviométrie journalière, le potentiel hydrique et les températures du sol. Chacun des sites étudiés possède des enregistrements de données climatiques.

Les fichiers "Maquettes" (représentant l'état structural du lit de semences) et "Profondeurs de semis"

Pour réaliser une "maquette" du lit de semence, plusieurs données sont nécessaires : dimensions des lits de semences représentés, nombre d'agrégats par classe de taille, répartition spatiale (en particulier agrégats visibles en surface ou enfouis).

Les fichiers "Profondeurs de semis" donnent la répartition des semences dans différentes couches du lit de semences (le pas d'épaisseur des couches est à choisir, dans le cas présent : par centimètre de sol depuis la surface), après le travail du sol considéré. La distribution des profondeurs de semis dépend du type de travail du sol et d'outil utilisé pour semer les graines.

Les caractéristiques biologiques des semences des espèces

Chaque espèce est décrite par un fichier récapitulant ses propres valeurs de paramètres : température et potentiel hydrique de base de la germination et la levée des plantules, distribution en temps thermique des vitesses de germination, paramètres de la fonction d'allongement, probabilité de rester bloquée sous un obstacle (mottes ou croûte).

8.2.3. Les sorties

Le logiciel simule des taux de levée et germination pour chacun des scénarios testés. Les fichiers de sortie regroupent différentes variables définissant les caractéristiques tirées au sort et les variables calculées graine par graine (soit mille lignes par simulation). Pour chacune des simulations, les nombres de jours nécessaires pour atteindre différents pourcentages de taux de germination et de taux de levée sont calculés. Les taux de germination et de levée finaux sont donnés, ainsi que les pourcentages des différentes causes de mortalité pour chaque simulation.

8.3. Plan de simulation

Les valeurs des paramètres d'entrée pour chacune des espèces et des maquettes utilisées dans les simulations proviennent de travaux antérieurs réalisés sur les CIPAN (Dorsainvil ; 2002 ; Carrera et Dürr, 2004 ; Dorsainvil et al., 2005). Des adaptations ont été nécessaires dans certains cas. L'ensemble des choix a été réalisé avec le groupe d'experts réunis sur ce sujet.

8.3.1. Les sites climatiques étudiés

Parmi les 24 points retenus dans le Chapitre 7 (Figure 7-9), nous en avons sélectionné neuf, qui nous apportaient une première représentation de la variabilité des résultats de levée dans différents pédoclimats français contrastés, et aussi pour des régions où le nombre de dérogations à l'obligation d'implanter des CI était supérieur à la moyenne. Ainsi, ces 9 points climatiques (Figure 8-2) ont été choisis de manière à représenter la gamme des différentes classes de (pluie-ETP) et de température moyenne pendant la période de l'interculture (Août à Mars).

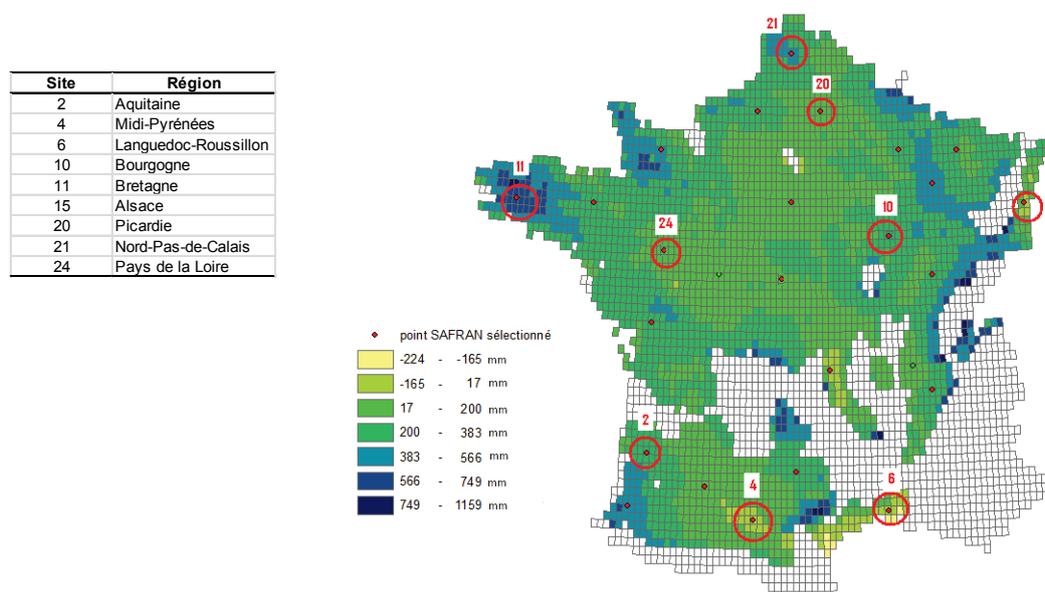


Figure 8-2. Localisation des points climatiques SAFRAN sélectionnés pour l'étude de la phase semis-levée, à partir d'une carte de France découpée en mailles de 12km x 12km identifiées par classe de (pluie – ETP) de août à mars, sur les zones vulnérables "Nitrate" croisées avec les grandes régions agricoles (Données Météo-France)

Cette sélection permet d'avoir un échantillon de climats contrastés afin de réaliser une étude de sensibilité de la levée des cultures intermédiaires. Les sites sélectionnés correspondent à deux points (20 et 21) situés au Nord, trois au Sud avec un gradient Ouest-Est (2, 4, 6) et quatre points avec un gradient également Ouest-Est de la pointe Bretagne à l'Alsace (11, 24, 14, 15). Ce choix nous permet de tester des climats secs et chauds au Sud, et plus humides et contrastés en températures au Nord sur 20 ans pour la période 1988-2008.

Ce choix de points permet aussi d'explorer des textures de sol contrastées, allant de textures grossières (sol sableux) à fines (sol argileux), avec chacune des quatre classes de texture présente pour au moins deux climats différents. Le Tableau 8-1 récapitule les classes de textures pour des différents sites sélectionnés.

Texture dominante de surface				
	Fine (Sol 4)	Moyennement Fine (Sol 3)	Moyenne (Sol 2)	Grossière (Sol 1)
Point 2			X	X
Point 4	X		X	
Point 6			X	
Point 10	X	X	X	
Point 11		X	X	
Point 15	X		X	
Point 20		X	X	X
Point 21		X	X	
Point 24		X	X	

Tableau 8-1. Texture des différents sols pour chacun des sites

8.3.2. Les espèces

Les simulations ont été réalisées pour trois espèces : la moutarde (Brassicacée), le ray-grass italien (RGI, Graminée) et la vesce (Légumineuse). Les données utilisées pour caractériser la moutarde et le ray-grass d'Italie sont issues d'expérimentations préalables publiées (Dorsainvil, 2002 ; Dorsainvil et al., 2005). Pour la vesce, nous avons utilisé les données d'une légumineuse ayant potentiellement des caractéristiques proches de la vesce, une luzerne annuelle (luzerne tronquée, *Medicago truncatula* ; Brunel et al, 2009). Le Tableau 8-2 récapitule les valeurs de ces caractéristiques par espèce. Les valeurs concernant la vesce sont vraisemblables mais seraient à établir spécifiquement, la valeur de la température de base a été d'ores et déjà très rapidement vérifiée. Ce travail serait d'ailleurs utile sur un plus grand nombre d'espèces pour mieux évaluer leur capacité d'implantation en différentes conditions limitantes de teneur en eau et température.

	Moutarde	RGI	Vesce
Température de base pour la germination et l'élongation de l'hypocotyle (Tb, °C)	3,2	4,6	5,6
Potentiel Hydrique (MPa)	1,04	2,5	0,8
Nombre de jours maximums au bout duquel les semences sont considérées non germées (j)	30	30	30
Taux germination maximum du lot (%)	100	95	100
Somme température nécessaire pour atteindre 80% germination (°Cj)	18	25	20
Probabilité d'émergence de toutes les plantules dans le cas d'une croûte sèche (%)	60	60	60
Age maximum des plantules (°Cj, calculé en utilisant la Tb mentionnée par espèce)	175	175	175

Tableau 8-2. Valeurs des paramètres "Semences et plantules" données au modèle SIMPLE

Ces trois espèces permettent de balayer une gamme de tolérance au stress hydrique. La légumineuse est la culture la plus exigeante en termes de seuils de température et teneur en eau (température et potentiel hydrique de base les plus élevés) pour germer. Le RGI apparaît *a priori* le plus résistant au stress hydrique. La moutarde a la température de base la plus faible et devrait donc germer et lever plus rapidement en absence de stress hydrique. Les taux de germination potentiels donnés comme paramètres d'entrée au modèle pour l'étude sont de 100% pour la moutarde et la vesce, et de 95% pour le RGI. Ce taux potentiel est le premier élément déterminant le taux de germination maximum possible et il influence le taux de levée obtenu. Cette différence entre le RGI et les deux autres espèces n'est certainement pas absolue. Le taux de germination peut être variable entre lots de semences pour les trois espèces. Nous avons considéré qu'affecter des taux potentiels de germination différents

pour les espèces contribuait à illustrer l'importance du taux potentiel de germination du lot de semences utilisé et de le connaître pour déterminer la densité de graines à semer au champ. Par ailleurs dans le cas de repousses de blé en particulier, la germination peut être ralentie, voire limitée, du fait de la dormance temporaire plus ou moins marquée selon les années et les variétés de blé. Là encore sur ce point précis, il y a un manque de données, qui seraient peut-être à acquérir si ce type de repousses était fréquemment utilisé.

8.3.3. Les dates de semis

Nous avons choisi trois dates de semis contrastées : le 15/07, le 15/08 et le 15/09, qui correspondent à la gamme des dates de semis les plus fréquemment pratiquées. Les simulations sont menées jusqu'au 10 novembre suivant. Les fichiers "climats" commencent le 14/07 et se terminent donc le 10/11. Les données des fichiers climatiques comportent la température moyenne journalière dans l'épaisseur du lit de semences sol, ainsi que l'humidité journalière par horizon de sol. Nous avons vérifié les performances de STICS pour générer l'évolution de l'humidité du sol sur des situations où des suivis expérimentaux ont été réalisés, avant de générer ces conditions de température et d'humidité du sol pour les situations à simuler avec le modèle SIMPLE. Les humidités générées ont été transformées en potentiel hydrique (exprimé en MPa) à l'aide de la relation entre humidité et potentiel hydrique selon la texture des quatre sols retenus dans l'étude (van Genuchten, 1980).

8.3.4. L'état structural du sol et les profondeurs de semis

8.3.4.1. Le travail du sol et les états structuraux du lit de semences

Les situations d'implantation considérées sont déterminées par le type de travail du sol et le mode de semis de la culture intermédiaire. La Figure 8-3 récapitule les choix réalisés qui conduisent à considérer 3 grands types d'implantation de ces cultures : 1) une situation sans travail du sol, 2) un travail du sol réalisé pour déchaumer et enfouir les graines en un seul passage, et 3) un travail du sol suivi d'une préparation du lit de semences et d'un semis au semoir pour positionner les graines dans le sol.

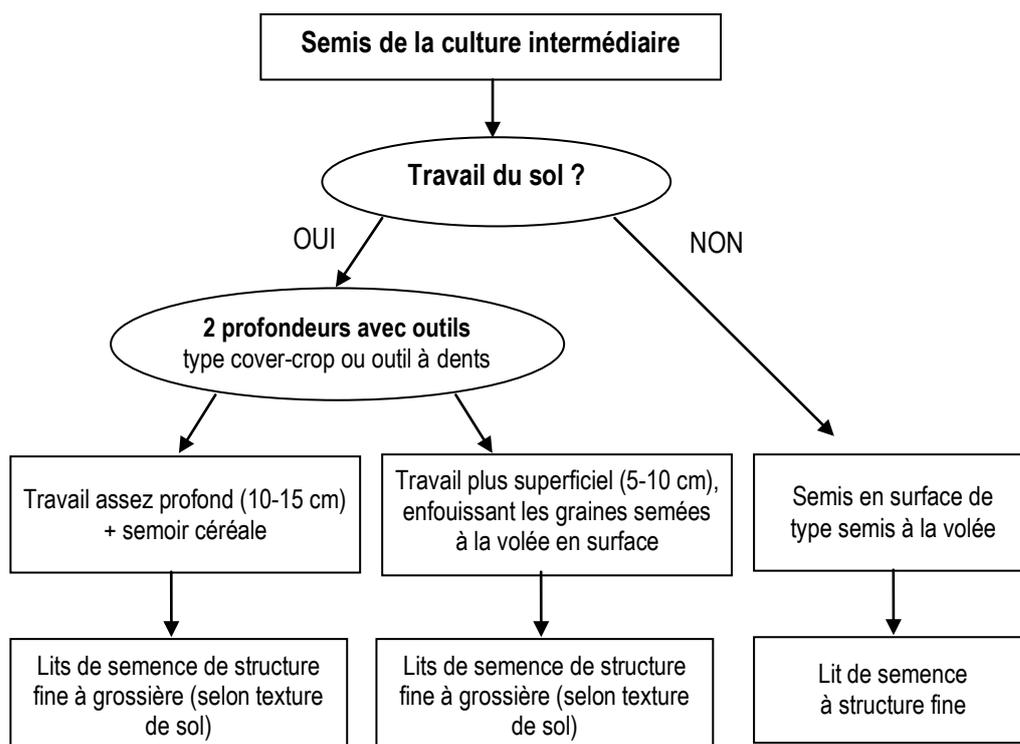


Figure 8-3. Types d'implantation simulés

L'état structural du sol dépend du travail du sol effectué et des conditions d'humidité lors de l'intervention. Par manque de temps pour coordonner les interactions possibles entre humidité du sol et résultats obtenus en terme de fragmentation du lit de semences, en relation avec le travail du sol, et pour simplifier le travail de simulation à réaliser, nous avons simulé différents états possibles du lit de semences sans tenir compte de l'humidité initiale au moment de la préparation du lit de semences. Toutefois, pour sa part, l'humidité du sol varie chaque année en fonction des conditions climatiques.

Taille des mottes (mm)		Etat structural du lit de semence		
		Fin	Intermédiaire	Grossier
< 10mm	Total	88%	65%	65%
	Surface	2%	9%	5%
[10-30 mm]	Total	12%	34%	33%
	Surface	14%	29%	22%
> 30mm	Total	-	1%	2%
	Surface	-	100%	100%

Tableau 8-3. Proportion de mottes de différentes tailles et localisation dans le lit de semences (Dorsainvil et al, 2005)

Nous avons retenu trois états-types : fin, intermédiaire et grossier. Ces états se distinguent par la proportion de mottes de différentes dimensions, et aussi par leur organisation spatiale dans le lit de semence (profondeur / surface).

8.3.4.2. Distributions des profondeurs de semis dans le lit de semences

Les données utilisées sont issues d'une étude réalisée sur la levée des cultures intermédiaires au champ en été (Dorsainvil, 2002 ; Dorsainvil et al., 2005).

La première technique de semis simulée est le semis à la volée, nommé profil "Surface", sans travail du sol. Les pailles de céréales sont broyées pour recouvrir les graines semées sous la barre de coupe à la récolte de la céréale. Le semis est réalisé en surface avec une répartition de 50% de graines à 2 mm de profondeur et 50% à 15 mm.

Le deuxième profil, appelé "Semoir", provient d'un travail du sol assez profond, repris ensuite avec une herse afin de briser les mottes ; les graines sont semées au semoir à céréale. Le positionnement des semences se situe autour d'une profondeur moyenne visée. La répartition des graines se fait jusqu'à 50 mm de profondeur avec près de 85% des graines situées entre 10 et 30 mm.

Le troisième profil, nommé "CC", représente un travail de sol simplifié, avec un semis en surface à la volée suivi d'un passage de déchaumage (de type cover-crop) réalisé pour enfouir les graines. Le profil "CC" correspond à une répartition plus hétérogène, et avec des semences plus en profondeur en moyenne (90% des graines se situent entre 5 et 45 mm, mais avec des graines enfouies jusqu'à 65 mm).

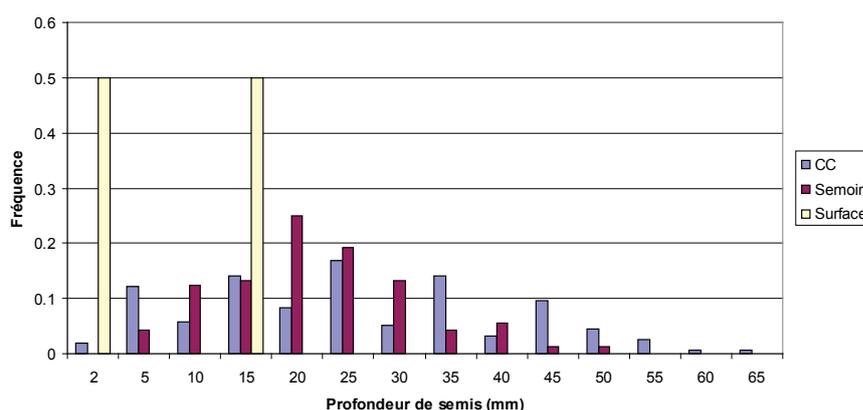


Figure 8-4. Distributions de profondeurs de semis simulées (en abscisse est indiquée la borne inférieure de la classe de profondeur)

Les simulations ont été réalisées en tenant compte de l'interaction entre l'état structural du sol et le profil de répartition des graines dans le lit de semences. Le Tableau 8-4 résume les conditions simulées. Nous n'avons pas fait varier l'état structural pour le semis à la volée en surface, car la levée des graines ne dépend pas de l'état structural du sol sous-jacent dans ces conditions de semis.

Profil graines/Etat structural		Travail sol		
		Surface	Semoir	CC
Etat structural	Fin	X	X	X
	Intermédiaire		X	X
	Grossier		X	X

Tableau 8-4. Combinaisons état structural x distribution des profondeurs de semis simulées

8.3.5. Résumé des simulations effectuées

Le Tableau 8-5 récapitule les situations simulées. Une croix indique que cette situation a été simulée pour chacune des 3 dates de semis et pour les 3 espèces sur les 20 années climatiques. Sachant que, sur l'ensemble des 9 points climatiques, il y a des sols de texture variable, à savoir 2 sols "grosiers", 9 sols "moyens", 5 sols "moyen-fins" et 3 sols "fins", ce sont au total 23 220 simulations qui ont été réalisées.

Etat structural du lit de semence	Distribution des profondeurs de semis	Texture des sols			
		Sol 1 (Grossier)	Sol 2 (Moyen)	Sol 3 (Moyen-Fin)	Sol 4 (Fin)
Fin	Surface	X	X	X	X
	Semoir	X	X	X	X
	CC	X	X	X	X
Intermédiaire	Surface	X	X	X	X
	Semoir	X	X	X	X
	CC	X	X	X	X
Grossier	Surface		X	X	X
	Semoir		X	X	X
	CC		X	X	X

Tableau 8-5. Récapitulatif des situations simulées pour les trois espèces, à trois dates de semis et pour 20 années climatiques

Le Tableau 8-6 récapitule les dénominations utilisées pour présenter les résultats.

Maquette	MaqF	Structure du lit de semence fin
	MaqI	Structure du lit de semence intermédiaire
	MaqG	Structure du lit de semences grossière
Espèce	Mou	Moutarde
	Rgi	Ray-grass
	Ves	Vesce
Distribution des profondeurs de semis	Surface	Type semis à la volée
	Semoir	Type labour
	CC	Type cover-crop
Sol-Texture	Sol1	Texture grossière
	Sol2	Texture moyenne
	Sol3	Texture moyenne-fine
	Sol4	Texture fine

Tableau 8-6. Dénominations utilisées pour les simulations

8.4. Résultats

Les résultats sont représentés par des boîtes à moustaches où sont matérialisés : i) la médiane (trait plein en gras dans la boîte rectangulaire), ii) le premier quartile et le troisième quartile définissant la boîte rectangulaire ; cette boîte contient donc 50% des valeurs simulées. Les bornes des moustaches délimitent les valeurs dans lesquelles se situent 99% des résultats. Les ronds correspondent aux situations extrêmes en dehors d'une répartition normale de la population. Les croix rouges représentent la moyenne de l'échantillon. Lorsque les résultats sont présentés par sites, ceux-ci sont classés du site ayant le cumul de (Pluie-ETP) sur les 3 mois (mi-juillet à mi-octobre) le plus faible (site 6) au site ayant ce critère le plus élevé (site 21).

Nous présentons dans un premier temps les caractéristiques climatiques des sites étudiés, conduisant en particulier aux humidités des lits de semences pour lesquelles les simulations ont été réalisées. Des exemples de ces variations de teneurs en eau simulées sont donnés.

Puis nous présentons les résultats des simulations, en analysant successivement : les variations des taux de germination ; les taux et les durées de levée simulés et enfin, les causes de mortalité à l'origine des variations de taux de levée.

8.4.1. Caractéristiques climatiques des sites et du lit de semences

8.4.1.1. Données climatiques des sites choisis

Pour chaque graphique présenté ci-dessous, chaque boîte à moustaches représente 20 années climatiques du site considéré. Le code de chaque boîte donne le numéro du site représenté et le mois.

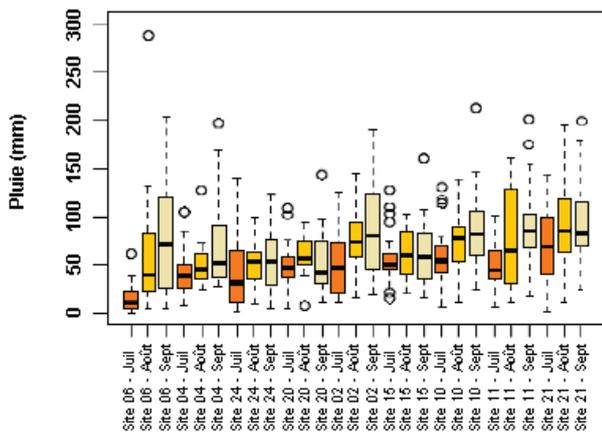


Figure 8-5. Précipitations mensuelles pour les trois mois de semis, sur les neuf sites

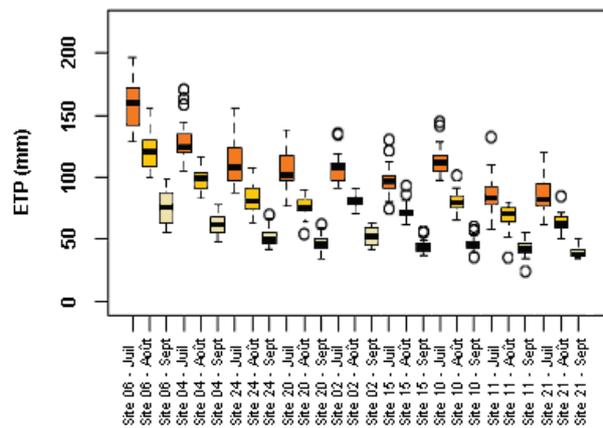


Figure 8-6. ETP mensuelles (mm) pour les trois mois de semis, sur les neuf sites

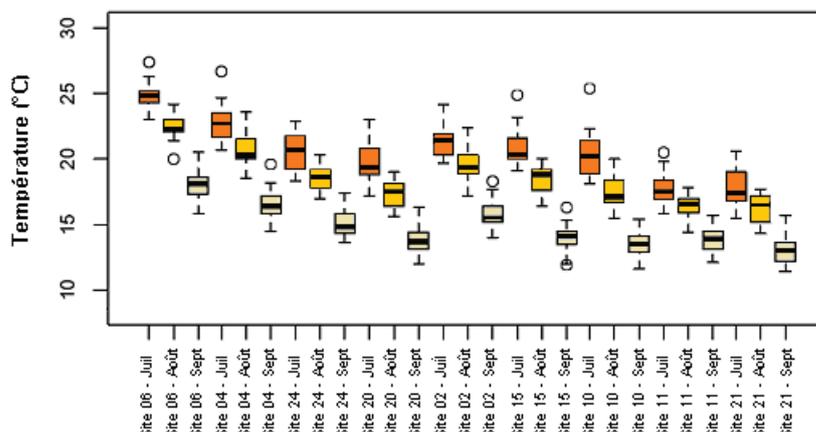


Figure 8-7. Températures moyennes mensuelles pour des mois correspondant aux dates de semis sur les neuf sites

Les précipitations sont très variables tout au long des mois de juillet à septembre, avec globalement un mois de juillet moins arrosé. Le site 6 (climat méditerranéen) présente une forte variabilité de précipitations, avec une pluviométrie très faible pour le mois de septembre ; il présente aussi les pluviométries maximales observées (près de 300 mm en août). Quels que soient les sites, les ETP de juillet sont les plus élevées, et diminuent jusqu'au mois de septembre. Les sites 4 et 6, situés dans le sud (Haute-Garonne et Gard), présentent les ETP les plus importantes, en cohérence avec leur situation géographique. De la même façon, les sites 4 et 6 ont des températures élevées, alors que le site 11 (Finistère) a les moyennes de températures les plus faibles. Le mois le plus chaud du site 11 (juillet) a une température moyenne égale au mois le plus froid du site 6 (septembre).

8.4.1.2. Exemples d'humidités du sol simulées avec STICS

Les données d'humidité et de température du sol par horizon du lit de semences (0-2 cm ; 2-6 cm ; 6-10 cm), à pas de temps journalier, ont été simulées à partir du modèle STICS pour les neuf sites, sur 20 années (1989 à 2008).

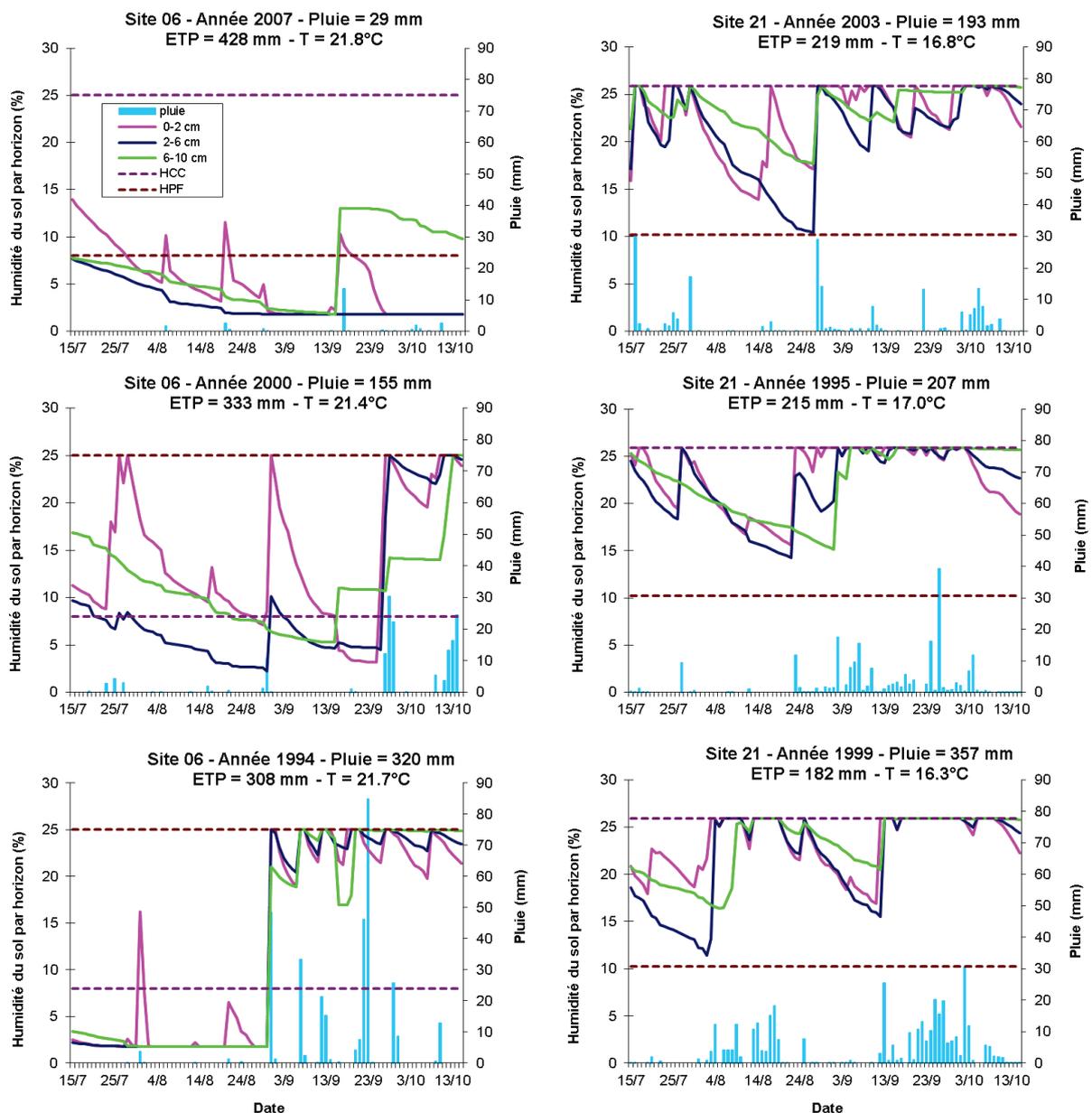


Figure 8-8. Graphiques mettant en relation les précipitations et humidités simulées par horizon de sol, pour deux sites (site 6 sec et site 21 humide) et trois années (1994, 200 et 2007) aux climats différents

Les six graphiques de la Figure 8-8 présentent les humidités journalières des différents horizons (0-10 cm) des sols étudiés ainsi que la pluviométrie, pour deux sites aux climats différents, soit le site 6 (région Languedoc-Roussillon) et le site 21 (région Nord Pas-de-Calais). Les variations d'humidité du sol dans les horizons du lit de semences sont illustrées pour trois années contrastées, sèche (2007), moyenne (2000) et humide (1994). Les capacités au champ ainsi que les points de flétrissement des sols de ces sites sont indiqués en pointillés sur chaque graphique.

La pluviométrie et l'ETP cumulées sur les 4 mois de mi-juillet à mi-octobre sont très différentes pour ces deux sites et pour les trois années, indiquant des conditions de climat du sol très contrastées. La température moyenne est d'environ 5°C inférieure dans le site 21 en comparaison du site 6, indiquant de fortes différences entre ces 2 sites.

La Figure 8-8 montre les différences fortes, entre les 3 années et les 2 sites, des teneurs en eau du sol pour 3 horizons superficiels correspondant au lit de semences des cultures intermédiaires. Les teneurs en eau du lit de semences sont fortement déterminées par la pluviométrie. Ainsi, le site 21 aux pluies plus fréquentes et aux ETP plus faibles, n'a aucune teneur en eau simulée avec STICS inférieure à l'humidité au point de flétrissement, contrairement au site 6. Le site 6 est généralement très peu pluvieux en été mais peut subir des pluies très abondantes, comme en 1994, où près de 85 mm de pluie sont tombés en une journée.

Globalement, la teneur en eau du lit de semences est très faible en juillet et août, et peut donc être très limitante pour la germination et la levée des cultures intermédiaires. Le mois de septembre est généralement plus humide.

8.4.2. Variation des taux de germination

La non-germination est la première cause pouvant expliquer une partie de non-levée des graines semées due en particulier à une humidité ou une température insuffisantes du sol sur une longue période (fixée à 1 mois pour les simulations : au-delà de cette durée les graines qui n'ont pas réussi à germer sont considérées comme ne germant plus).

La Figure 8-9 présente les taux de germination simulés pour les 9 sites climatiques et regroupe l'ensemble des combinaisons (date de semis, état structural et profil de graines dans le lit de semences) pour chacune des 3 espèces.

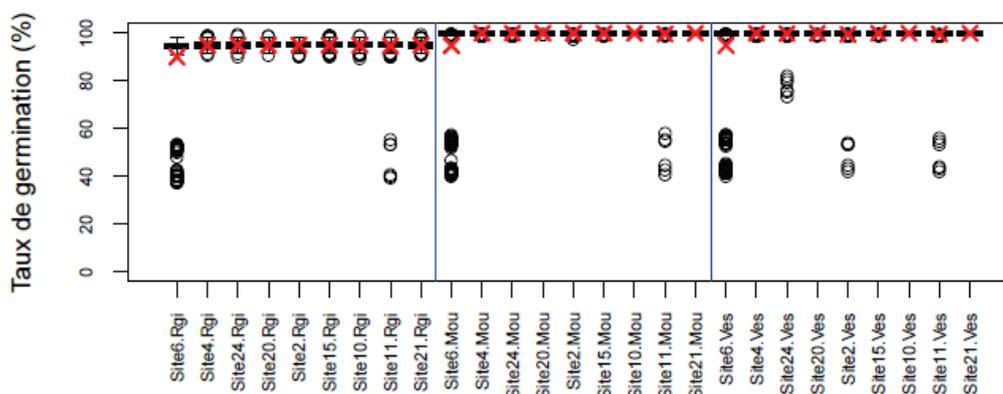


Figure 8-9 Taux de germination pour les trois espèces sur les neuf sites

Il apparaît que la moutarde et la vesce présentent des taux moyens de germination voisins de 100%, et le ray-grass des taux moyens de l'ordre de 95% pour tous les sites, excepté pour le site 6 où le taux est de l'ordre de 90%. Cette différence est liée aux valeurs de germination maximale avec lesquelles a été paramétré le modèle SIMPLE.

Il y a donc relativement peu de situations où le taux de germination est réduit par les conditions de température et teneur en eau du sol. La germination n'apparaît pas en moyenne comme étape limitant la levée des CI, hormis via la qualité initiale des semences utilisées. Cependant, des taux de germination faibles, de l'ordre de 40%, sont simulés dans certaines conditions de sécheresse se prolongeant sur des durées supérieures à 20-30 jours pour

les 3 espèces, pour les sites 6 (fréquence 7 années sur 20 avec certaines conditions de semis) et 11 (1 année sur 20). L'espèce au potentiel hydrique seuil le plus élevé (vesce) présente aussi des taux de germination altérés pour certaines simulations des sites 24 et 2.

8.4.3. Variations des taux et de la durée de la levée simulés

8.4.3.1. Effet de l'espèce semée

Les Figures 8-10 et 8-11 présentent les taux et durées de levées simulés pour les 9 sites. Elles regroupent l'ensemble des combinaisons (date de semis, état structural et profil de graines dans le lit de semences) pour chacune des 3 espèces.

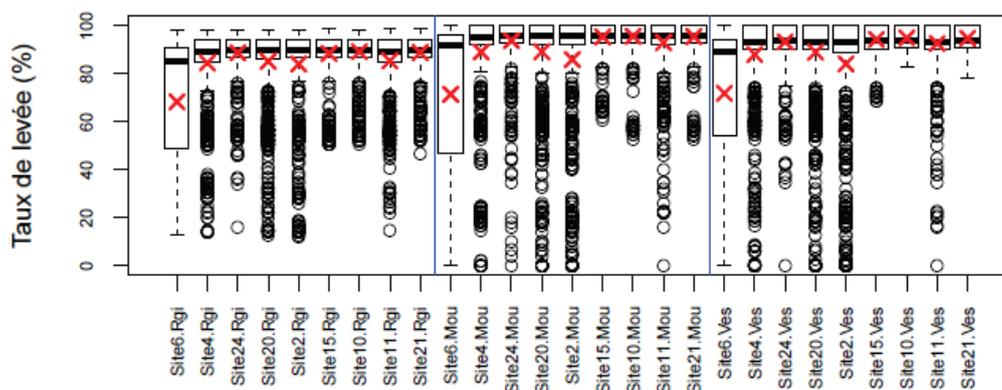


Figure 8-10. Taux de levée pour chaque espèce sur les neuf sites

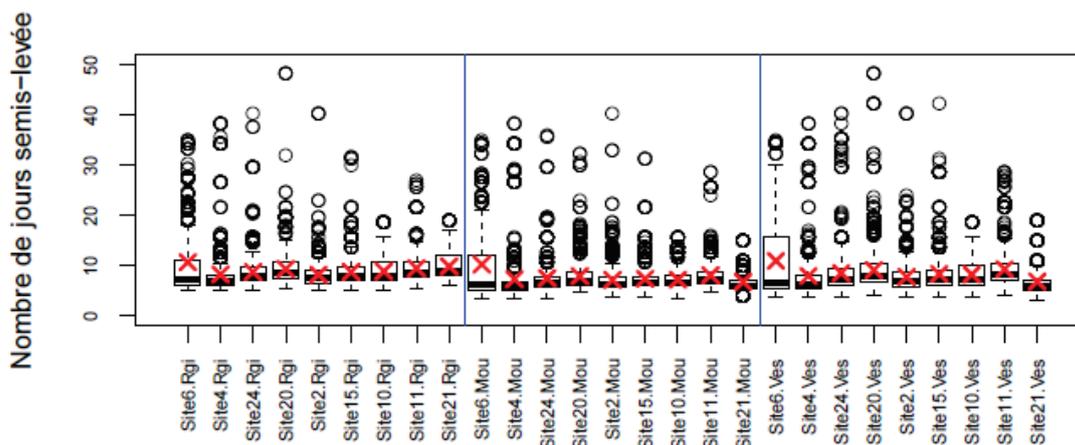


Figure 8-11. Durée nécessaire pour atteindre le taux maximum de levée pour chaque espèce sur les neuf sites

La vesce et la moutarde présentent des taux de levée médians voisins et élevés, de 92 et 96% respectivement. Le ray-grass présente un taux de levée moyen un peu plus faible, de l'ordre de 90%, s'expliquant par le taux de germination légèrement plus faible donné au lot de semences.

Mais, la variabilité des taux de levée est importante, et les taux simulés varient de 0 à 100%, pour six des neuf sites étudiés.

Le site 6 présente une grande variabilité de taux de levée, avec 25% des simulations aux taux de levée inférieurs à 50% pour les trois espèces. La médiane et surtout la moyenne pour le site 6 sont les plus faibles, quelle que soit l'espèce semée, avec une levée moyenne de l'ordre de 70% pour les 3 espèces.

A l'opposé, les sites 10, 15 et 21 obtiennent systématiquement des taux de levée supérieur à 50% quelle que soit l'espèce semée. Ils présentent les plus fortes valeurs moyennes et les écarts-types les plus faibles. La variabilité

des résultats sur ces sites est plus faible en raison de leur pluviométrie mieux répartie durant les mois d'été et de début d'automne.

Les simulations indiquent une durée moyenne de la phase semis-levée, variant de 7 à 11 jours. La moutarde et la vesce lèvent en moyenne 2 à 3 jours plus rapidement que le ray-grass. La variabilité de la durée de la phase semis-levée de la vesce est sensiblement plus forte que pour les deux autres espèces dans le cas du site 6, en relation avec la plus grande sensibilité de la vesce aux situations de stress hydrique. Toutefois, la variabilité des durées de levée apparaît importante pour les trois espèces. Elles ont parfois un nombre de jours nécessaires pour atteindre une levée maximale qui dépasse 30 jours pour les sites 4, 6, et 20 (environ 1 année sur 10, en fonction des conditions de semis simulées).

8.4.3.2. Effet de la date de semis

Les taux et la durée de la levée sont analysés pour chacune des 3 dates de semis mais en ne présentant les résultats que pour une seule situation de type de sol et d'état structural. Le sol pris en compte ici est de texture moyenne (limoneuse) et l'état structural est moyennement motteux (maquette intermédiaire).

Les Figures 8-12 et 8-13 présentent les taux et durées de levées simulés pour les 9 sites climatiques et agrègent les résultats obtenus pour les différentes distributions de profondeurs de semis et les 3 espèces. En effet, les simulations n'indiquent pas de différence notable d'effet de la date de semis sur la réponse de chacune des 3 espèces.

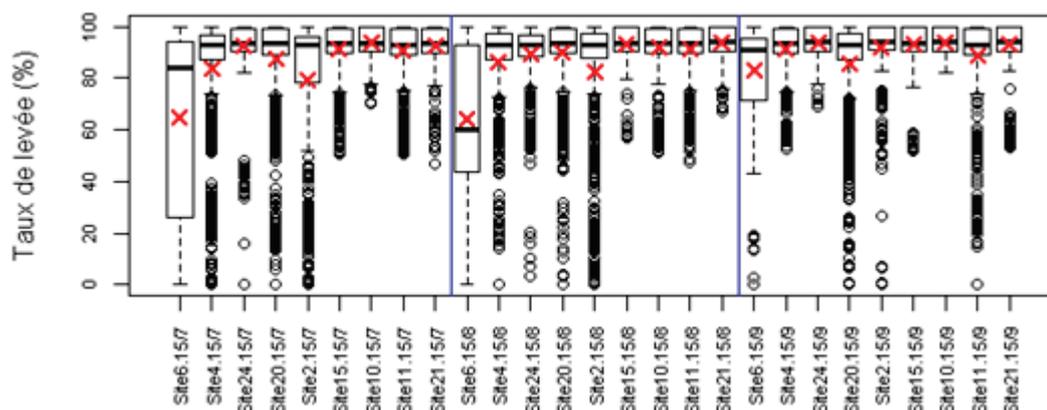


Figure 8-12. Taux de levée pour les trois dates de semis et pour les neuf sites

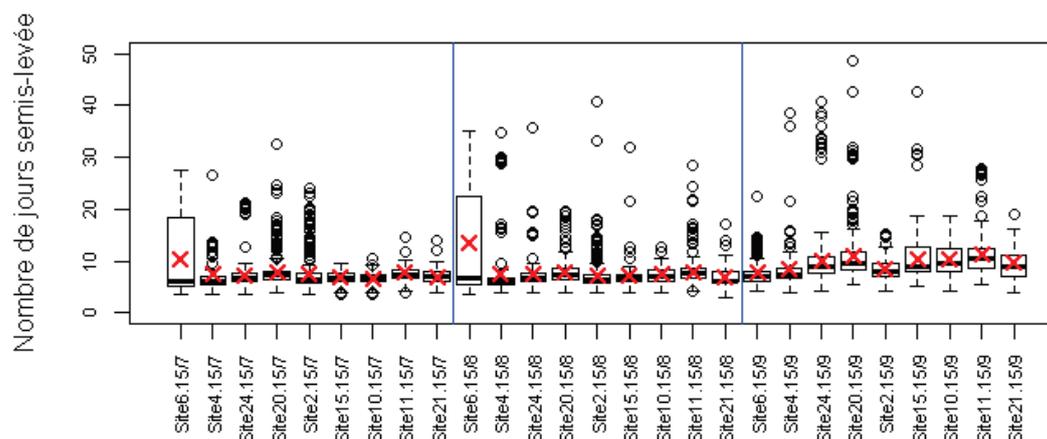


Figure 8-13. Nombre de jours nécessaires pour obtenir le taux maximal de levée, pour les trois espèces et les neuf sites

Les médianes et les moyennes (Figure 8-12) de taux de levée simulés sont plus élevées pour les semis du 15 septembre, pour 6 des 9 sites. Pour les sites du Sud de la France (sites 2, 4 et 6), le semis de septembre a un effet positif sur le taux de levée, avec plus de 15% d'écart avec un semis réalisé mi-juillet ou mi-août. Pour les sites localisés plus au Nord, les écarts des médianes et des moyennes sont faibles.

La variabilité des taux de levées est plus importante lors d'un semis en juillet, que pour un semis en août. Le semis de septembre permet d'obtenir les taux de levée les moins variables, pour la plupart des sites (sauf le site 11 qui présente des résultats un peu plus hétérogènes lors d'un semis de septembre que pour un semis de juillet ou d'août).

L'effet de la date de semis est modéré mais significatif sur la durée moyenne de la levée (Figure 8-13), qui est légèrement réduite pour les semis des mois de juillet et août (durées moyennes de l'ordre de 8 jours). La durée de la levée est allongée de quelques jours pour les semis de septembre, pour les sites plus au Nord. L'augmentation s'explique par des températures des sols plus faibles.

Toutefois, le site 6 (climat méditerranéen) se différencie très largement, avec une durée de levée maximale très variable en juillet et en août, pouvant être supérieure à 3 semaines, et une durée de levée réduite en septembre. Le semis de septembre apparaît mieux adapté pour ce site (conditions climatiques sèches).

Les durées de levées supérieures à 30 jours sur les différents sites pour l'ensemble des dates de semis sont dues à des épisodes sans pluie de longue durée après un semis dans un sol sec. Ces cas restent cependant peu fréquents sur l'ensemble des résultats des simulations.

Nous avons voulu illustrer plus précisément les fréquences des taux de levée obtenus selon la date de semis sur les différents sites.

La Figure 8-14 présente la fréquence répartie en 4 classes des taux de levées simulés pour les 9 sites climatiques en fonction de la date de semis et prenant en compte l'ensemble des profils de répartition des graines dans le lit de semences et les 3 espèces.

Ces quatre classes correspondent à différentes situations :

- un taux de levée d'au moins 75%, estimé suffisant pour avoir un couvert efficace de culture intermédiaire ;
- un taux compris entre 75 et 50% : la densité de plantes peut être suffisante mais une répartition spatiale des plantes hétérogène ne permet pas une croissance et une absorption d'azote minéral optimales ;
- un taux compris entre 25 et 50%, avec une densité de plantes insuffisante, et ce d'autant plus que la répartition des plantes levées est hétérogène ;
- un taux de levée inférieur à 25%, correspondant à un échec complet du semis.

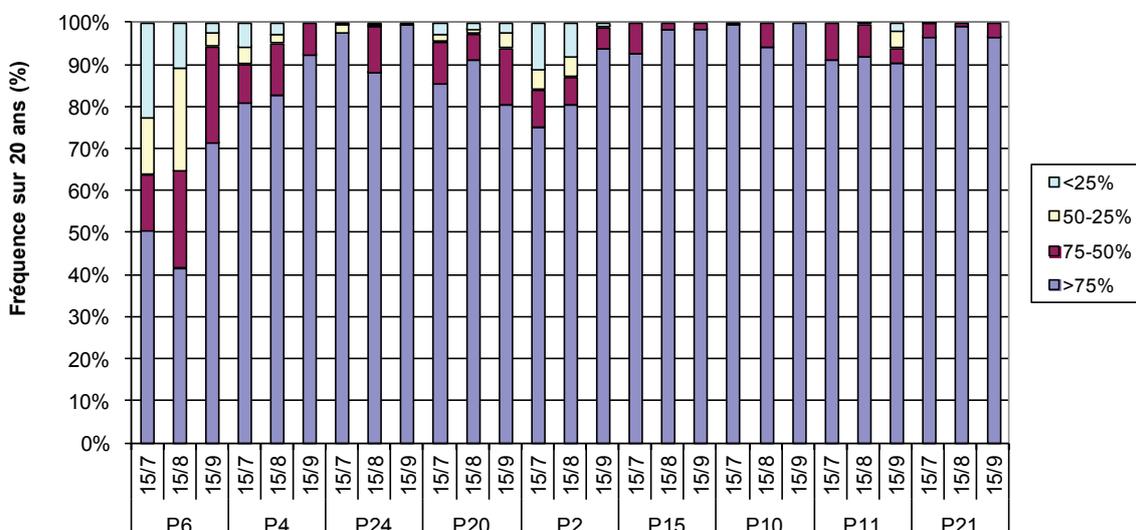


Figure 8-14. Fréquences sur 20 ans de taux de levée pour les trois dates de semis sur les neuf sites

Les simulations indiquent une fréquence élevée de taux de levée supérieurs à 75% sur les 20 années simulées pour la plupart des sites et des dates de semis. Sur quelques sites cependant, la fréquence d'un taux de levée inférieur à 75% est plus importante, le site 6 en particulier avec une fréquence de taux de levée < 75% d'environ une année sur 2. On retrouve ce résultat pour les sites 2, 4, 11 et 20, mais avec une fréquence nettement plus faible, de l'ordre d'une à deux années sur 10. La fréquence d'un faible taux de levée varie avec la date de semis. Pour les sites du Sud de la France (2, 4 et 6), le semis au mois de septembre permet d'accroître significativement la fréquence de taux de levée supérieurs à 75%.

Les fréquences simulées de taux de levée inférieurs à 50%, voire à 25%, restent faibles mais existent sur les 20 années climatiques explorées.

8.4.3.3. Effet du type de sol

Les taux et la durée de la levée sont analysés séparément pour chacun des sols représentés dans les 9 sites climatiques. Le sol 1 est de texture grossière (sol sableux) et le sol 4 de texture fine (argileux) ; les deux autres sols sont des textures intermédiaires limoneuses.

Les Figures 8-15 et 8-16 présentent les taux de levées simulées pour les 9 sites et agrègent les résultats obtenus pour l'ensemble des distributions de profondeurs de semis et les 3 espèces.

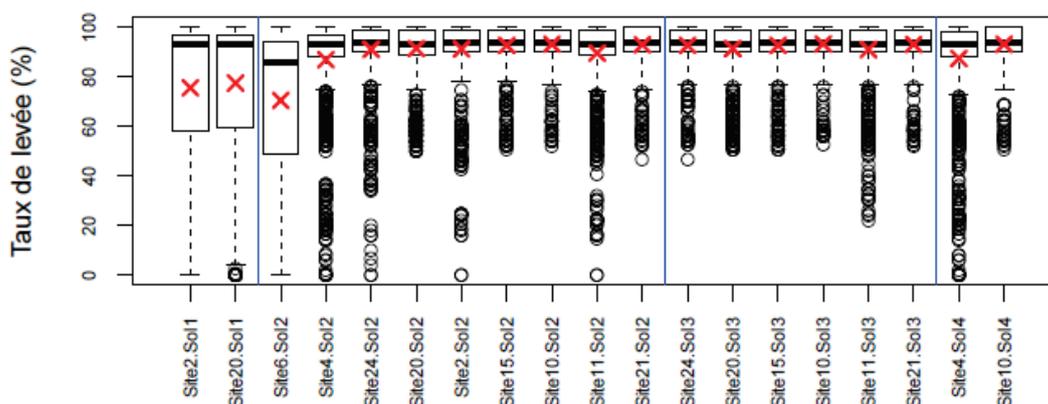


Figure 8-15. Taux de levée pour les différents sols présents sur les neuf sites

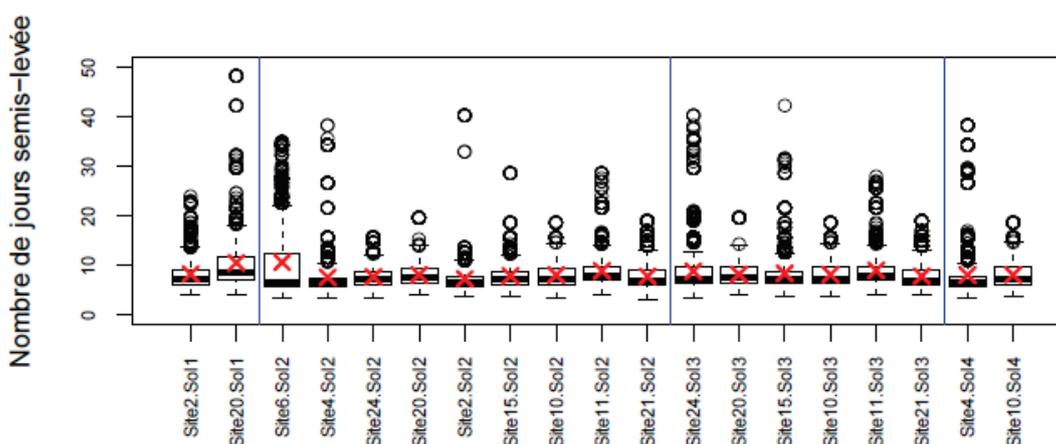


Figure 8-16. Nombres de jours nécessaires pour atteindre le taux maximal de levée pour les différents sols sur les neuf sites

Les taux de levée sont significativement plus faibles en texture grossière pour les 2 sites concernés, avec en moyenne moins de 80% de taux de levée, contrairement aux autres situations pédoclimatiques où ce taux est de l'ordre de 90%. Ce résultat s'explique par un dessèchement plus rapide des sols sableux induisant des pertes de

plantes aboutissant à des levées nulles dans certains cas. Les sites du Sud se distinguent par des taux de levée moyens plus faibles, aussi bien pour le sol à texture grossière (site 2), le sol limoneux (site 6) que pour la texture fine (site 4).

L'effet du type de texture du sol est limité sur la durée de la phase semis-levée, excepté pour le sol à texture sableuse où la durée moyenne peut être allongée de quelques jours, tout comme pour le site 6 avec la texture limoneuse.

8.4.3.4. Effet de l'état structural du lit de semences

Les résultats obtenus étant peu variables selon les espèces, les résultats ci-dessous illustrent les simulations réalisées dans le cas de la moutarde en sol limoneux pour les 3 dates de semis considérées.

Les Figures 8-17 et 8-18 présentent les taux et durée de levée de la moutarde simulés pour les 9 sites en fonction de l'état structural pour les deux distributions de profondeurs de semis où les graines sont enfouies (profils de graines "semoir" et "CC") et le sol 2 (moyen fin).

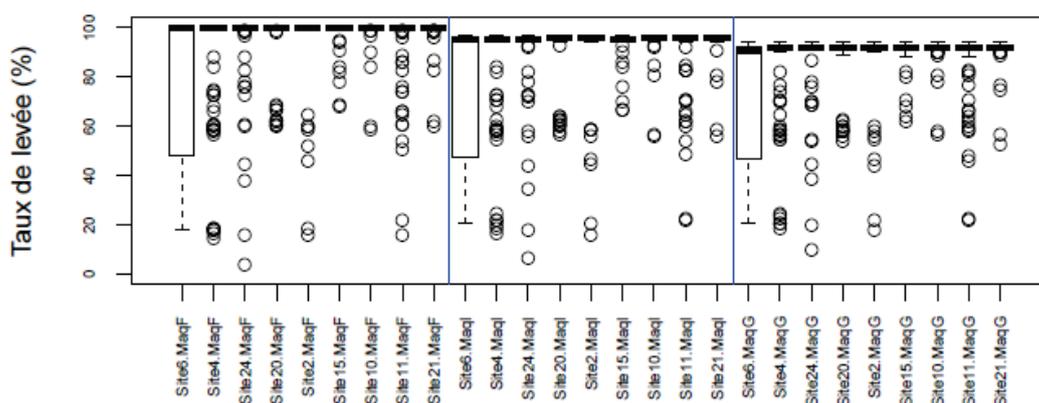


Figure 8-17. Taux de levée pour les différents états structuraux sur les neuf sites

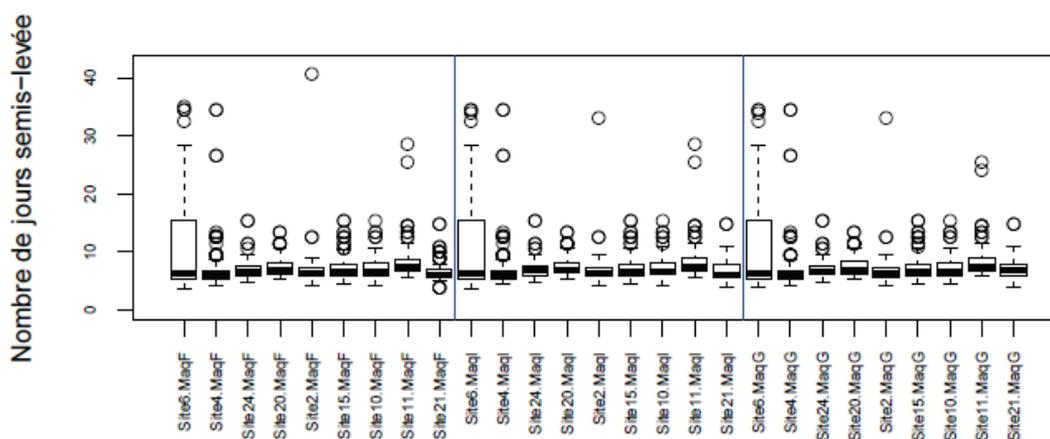


Figure 8-18. Nombres de jours nécessaires pour atteindre le taux maximal de levée par état structural sur les neuf sites

Les simulations mettent en évidence des différences de taux de levée selon l'état structural. L'état fin (MaqF) induit de meilleurs taux de levées que les deux autres états structuraux, avec environ 100% de levée pour 8 sites sur 9. L'état structural grossier (MaqG) réduit significativement le taux médian de levée de l'ordre de 10%.

Alors que les taux de levée sont significativement affectés par l'état structural du sol, la durée de la phase semis-levée n'est elle que peu affectée par l'état structural du lit de semences pour un même profil de répartition des graines dans le sol.

8.4.3.5. Effet de la distribution des profondeurs de semis

Les résultats obtenus étant peu variables entre les 3 espèces (pas d'interaction notable entre espèce et profil de répartition des graines), l'illustration ci-dessous correspond aux simulations réalisées avec les 3 espèces confondues et les 3 dates de semis considérées.

Les Figures 8-19 et 8-20 présentent les taux de levée simulés pour les 3 espèces pour les 9 sites en fonction du profil de répartition des graines semées dans le lit de semences (3 profils de graines : "semoir", "CC" et "surface") en considérant les 3 états structuraux du sol.

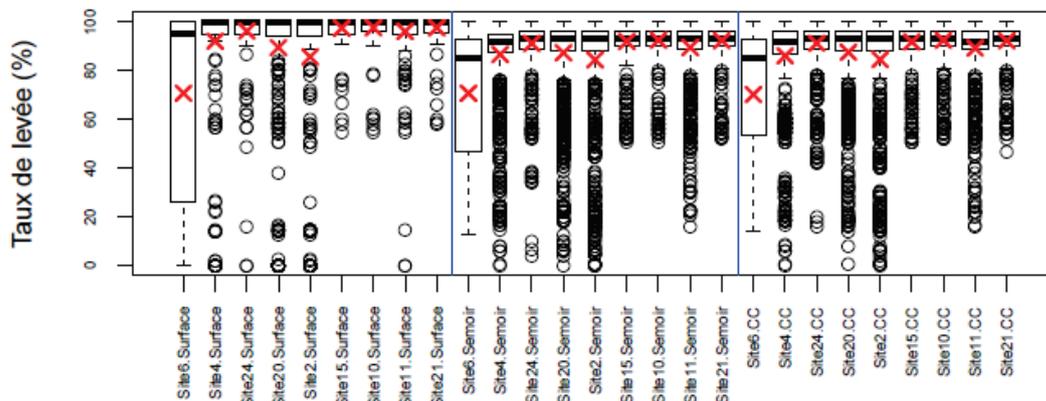


Figure 8-19. Taux de levée pour les différents profils de répartition sur les neuf sites

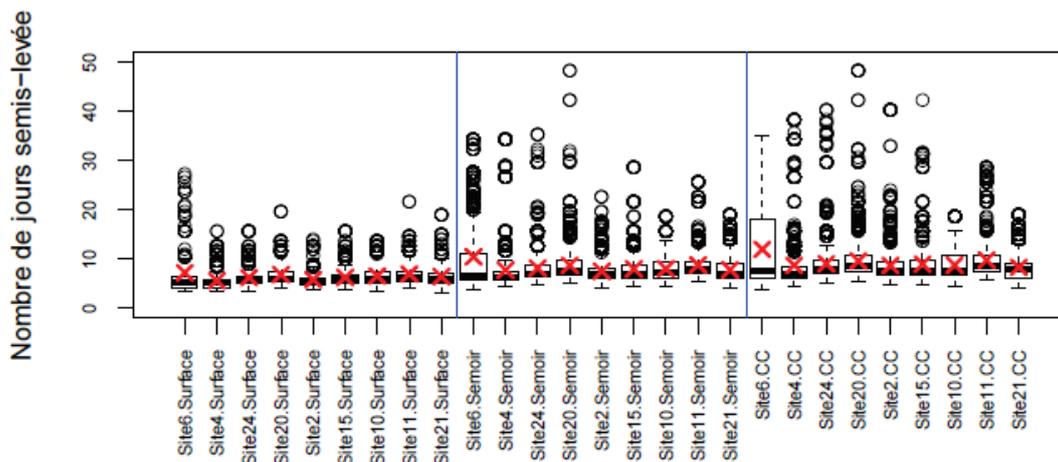


Figure 8-20. Nombres de jours nécessaires pour atteindre le taux maximal de levée pour les différents profils de répartition sur les neuf sites

Les taux de levées simulés avec les profils "CC" et "semoir" sont assez similaires, avec la majorité des simulations comprises entre 85 et 95% de levée, mais avec quelques cas où les taux de levée sont faibles.

Les résultats du site 6 diffèrent toujours de ceux des autres sites, avec des taux de levée nettement plus faibles.

Pour le profil de répartition en "surface", les taux de levée de 8 sites sur les 9 seraient proches de 100% car les plantules ne rencontrent pas d'obstacle mécanique à la levée. Mais sur le site 6, le taux de levée peut être très significativement affecté pour un semis en "surface". C'est un mode de semis qui peut induire des résultats de levée nuls sur 5 des 9 sites testés. Le semis en "surface" est nettement plus sensible aux conditions de forte dessiccation après une pluie, qui peut permettre la germination mais ensuite entraîner la mort des graines ayant germées suite à un rapide dessèchement du sol.

Les simulations indiquent que le profil "CC" (technique simplifiée avec graines semées en surface puis enfouies par déchaumage) présente des durées de la phase semis-levée légèrement plus longues que le profil "semoir" et

surtout "surface". De plus, bien que la majorité des résultats se situent entre 5 et 10 jours pour lever, plusieurs scénarios montrent qu'il faut plus de 2 semaines pour parvenir au taux de levée maximal. Plusieurs situations dépassent même 30 jours pour lever, en particulier pour le site 6 et marginalement pour les sites 2 et 4 (Sud de la France). *In fine*, en considérant un profil "CC", 99% des résultats sont compris entre 5 et 35 jours pour atteindre le taux de levée maximal, alors que pour le profil "semoir" 99% des taux de levée sont compris entre 5 et 20 jours.

Enfin, le profil de répartition "surface" permet une réduction moyenne de la durée de levée. Ainsi, malgré quelques cas où les cultures ont mis plus de temps que la normale (site 6), la durée de la phase semis-levée ne dépasserait pas 15 jours, à quelques exceptions près.

8.4.4. Analyse des causes de non-levée

Un des intérêts de l'utilisation du modèle est, au-delà de l'obtention de taux de levée, de pouvoir analyser les différentes causes de mortalité ayant entraîné ce taux de levée. Ce type d'analyse est très rarement réalisé sur le terrain car il nécessite des observations longues et fastidieuses, voire impossibles à réaliser.

Les résultats étant très peu différents entre espèces, nous avons choisi d'illustrer les résultats simulés obtenus dans le cas de la moutarde.

8.4.4.1. Taux de mortalité en fonction de la date de semis

Les taux de levée élevés pour un semis en septembre s'expliquent par des taux de mortalité par stress hydrique beaucoup plus faibles que pour les deux autres dates de semis, en particulier sur le site 6, qui est aussi pratiquement le seul où apparaissent des pertes par non-germination.

La mortalité sous motte est sensiblement identique quels que soient les sites et la date de semis, cette cause de non-levée ne dépendant que de l'état structural du lit de semences. La mortalité sous croûte reste relativement limitée.

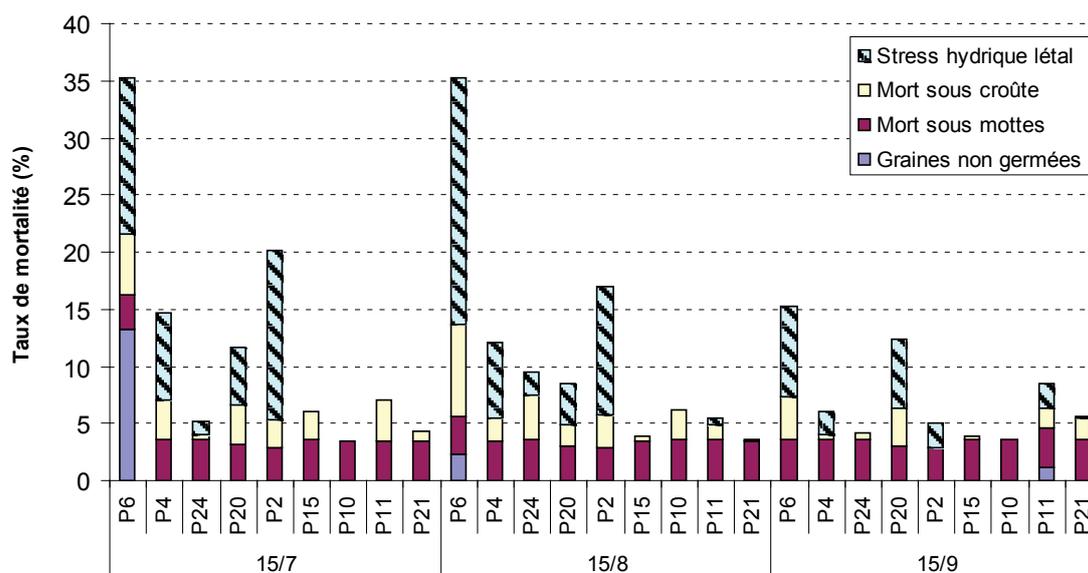


Figure 8-21. Taux moyens des différentes causes de mortalité pour la moutarde par site et date de semis

8.4.4.3. Taux de mortalité en fonction de l'état structural du lit de semences

La Figure 8-22 présente le taux de mortalité des graines simulé ainsi que la proportion de chaque cause de mortalité simulée par le modèle SIMPLE. Les résultats présentés concernent l'analyse de l'effet de l'état structural pour les profils de semis avec des graines enfouies ("semoir" et "CC").

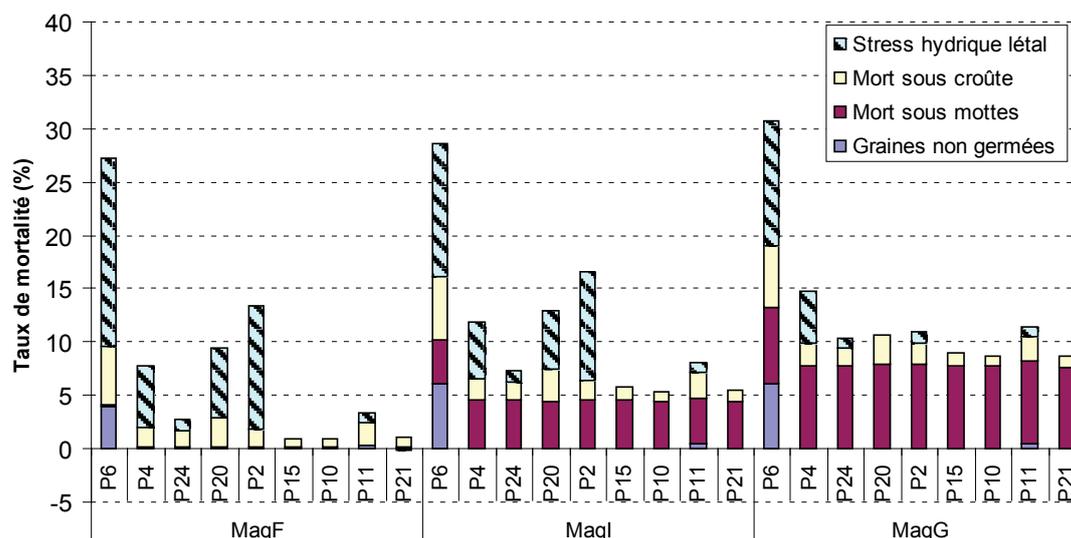


Figure 8-22. Taux moyens des différentes causes de non-levées de la moutarde pour les trois états structuraux du lit de semences simulés sur les neuf sites

Tous les sites ont un taux de mortalité inférieur avec l'état structural fin (MaqF). La mortalité sous mottes est la première cause de non-levée pour l'état structural grossier ; elle représente en moyenne 8% des cas de mortalité. En dehors des valeurs plus élevées au site 6, la mortalité sous croûte n'est pas très élevée en moyenne.

8.4.4.4. Récapitulatif des causes de mortalité et situations à risque

Le Tableau 8-7 résume les causes de mortalité conduisant à la non-levée des cultures intermédiaires et permettant d'identifier les scénarios à fort risque d'échec de l'implantation du couvert.

Mortalité	Non germées	Mort sous croûte	Mort sous mottes	Stress hydrique létal
Taux moyen	2,5%	1,8%	4,1%	2,9%
Taux maximum	63%	42%	14%	100%
Seuil de risque considéré	>50%	>40%	>10%	100%
Situation à risque	Site 6 CC Semis au 15/7	Tous les sites	Tous sites Etat structural grossier	Sites 2, 6 et 20 Semis en surface

Tableau 8-7. Taux moyen et maximal de mortalité par type de cause, et situations à fort risque d'échec de l'implantation de la culture intermédiaire

Les pourcentages des différentes causes de non-levée apparaissent faibles lorsque moyennés sur l'ensemble des simulations, mais l'analyse fréquentielle sur 20 années permet de révéler des situations où ces différents taux sont nettement supérieurs. Ainsi, les taux maximum simulés pour chacune des 4 causes de non-levée simulées par le modèle (Tableau 8-7), vont de 14% de perte pour des blocages sous mottes à 100% pour un stress hydrique post-germination.

Les cas de non-germination supérieure à 50% surviennent plus particulièrement dans le cas de semis précoces et pour des graines se trouvant placées en profondeur après la récolte de la culture ayant desséché le profil (cas de semis "CC"). Ce phénomène est accentué sur le site méditerranéen, et dû au manque d'humectation des graines pour que la germination puisse se produire.

Les stress hydriques post-germination peuvent entraîner 100% de mortalité, surtout pour des semis en surface. Ces forts stress hydriques concernent en majorité des sites climatiques ayant un déficit P-ETP de plus de 60 mm sur la période de juillet à septembre.

Les mortalités sous croûte de battance peuvent toucher jusqu'à 40% des graines semées, en particulier sous l'effet de pluies journalières isolées importantes (orage), suivies d'une période sèche entraînant dessiccation de la surface. Les taux de mortalité sous mottes restent modérés, avec un maximum de 14% pour les états structuraux grossiers testés.

8.5. Synthèse et conclusion

Les simulations réalisées ont eu pour objectif de balayer un ensemble de conditions de semis pouvant faire varier le résultat de l'implantation du peuplement des cultures intermédiaires et la mise en place du couvert, à la fois du point de vue des conditions climatiques, des types de sol, des états structuraux et des variations de profondeurs de semis.

Rappelons que ces simulations ne tiennent pas compte de causes de non-levée dues à des ravageurs et à des maladies fongiques. Ces pertes potentielles peuvent se produire aussi bien dans le sol avant levée qu'après la levée. Aucune étude sur cette question n'a été identifiée dans la bibliographie à ce sujet et il n'est pas possible d'indiquer quel serait l'impact de ces causes biotiques sur le taux de levée des cultures intermédiaires. Des travaux seraient nécessaires pour évaluer l'impact de ces facteurs biotiques sur la levée des cultures intermédiaires.

De la même façon, l'impact de températures très élevées (> 25°C de température moyenne, ou encore de températures maximales supérieures à 38°C qui empêchent la germination (Dorsainvil, 2002)) pendant la phase de levée n'est pas pris en compte dans ces simulations réalisées avec le modèle SIMPLE. Là encore, l'effet de ces conditions serait à évaluer, mais on peut supposer que de telles températures sont le plus souvent associées à des stress hydriques dont l'effet sur la réduction des taux de levée est pris en compte dans le modèle et les simulations réalisées.

Les résultats obtenus sont aussi très dépendants de la qualité des simulations des teneurs en eau dans les premiers centimètres du lit de semences. Nous avons toutefois vu que ces simulations, réalisées avec STICS, donnent une forte variabilité de ces teneurs en eau selon les années et les sites. Enfin, nous avons vérifié la qualité prédictive des simulations réalisées avec STICS de l'humidité du sol dans le lit de semences et pour les horizons sous-jacents STICS était tout à fait satisfaisante (efficacité du modèle > 0.5) pour reproduire les mesures d'humidité des expérimentations de Dorsainvil (2002), ce qui permet de supposer que les simulations d'humidité du lit de semences sont réalistes.

Il serait aussi possible en consacrant plus de temps au travail de simulations de tenir compte, date de semis par date de semis et année par année, de l'interaction entre humidité au moment du travail du sol et état structural obtenu pour le lit de semences. Cela augmenterait la réalité de représentation des variations des états au semis année par année. Cependant les années mises en évidence comme provoquant de faibles levées ont été repérées par les simulations réalisées, et la fréquence de leur nombre ne changerait sans doute que peu.

La réussite du semis doit être considérée en termes de taux et de durée des levées. Les principaux résultats des simulations réalisées avec le modèle SIMPLE sont les suivants :

- 1) Des taux de levée moyens supérieurs à 80% dans la très grande majorité des situations pédoclimatiques simulées, excepté en climat méditerranéen. Les différences de taux de levée entre espèces sont relativement faibles. Par contre, une source de variation importante pourrait être le taux de germination potentiel des semences utilisées.

Les simulations font cependant aussi apparaître des taux de levée très altérés par site et conditions de semis sur la base des données climatiques des vingt dernières années. Leur fréquence et donc le risque, peut être évalué par ces simulations : lorsque les taux de levée sont fortement altérés, les causes de non-levées importantes sont liées au stress hydrique pendant et après la germination et aussi à la formation d'une croûte de battance.

- 2) Des durées moyennes de la phase semis-levée comprises entre 6 et 11 jours, avec peu de différences entre espèces. Ces durées de levée sont allongées de quelques jours en cas de semis de septembre (pouvant aller jusqu'à 18 jours dans quelques sites du Nord de la France) du fait de températures moyennes plus faibles. Des cas de durée de levée beaucoup plus longues sont simulés (> 20 jours) sur tous les sites, mais plus rares et dus à des périodes sèches prolongées (1 année sur 10, levées durant plus de 30 jours pour les sites les plus exposés au stress hydrique, en plus du site méditerranéen)
- 3) Le site méditerranéen (site 6) a un comportement très différent des autres sites pédoclimatiques testés. Les simulations montrent une très forte variabilité des taux de levée, pouvant être nuls certaines années, notamment en cas de date de semis précoce en été. Pour cette situation, un semis de septembre permet de réduire significativement les risques de non-levée de la culture intermédiaire.
- 4) Les sols sableux (texture grossière) peuvent induire une forte variabilité des taux de levée et un niveau moyen inférieur de 15%, avec des non-levées dues à des stress hydriques post-germination létaux.
- 5) Un état structural du lit de semences très motteux peut réduire le taux de levée de l'ordre de 10% par rapport à un état plus fin.
- 6) Le semis de graines en surface sous mulch de paille peut être une technique efficace, sauf en situation climatique méditerranéenne où le risque engendré pour les levées est élevé.

Cette analyse par simulation indique donc que les cultures intermédiaires peuvent être semées en été avec souvent de bonnes chances de succès dans différents pédoclimats contrastés français. Les taux de levée moyens sont élevés (supérieurs à 80%), et les levées sont souvent obtenues en deux semaines après semis, ce qui correspond à une implantation de couverts potentiellement suffisants pour pouvoir piéger de l'azote minéral du sol ultérieurement. Les techniques simplifiées de semis analysées semblent donc suffisamment efficaces pour planter les cultures intermédiaires dans la plupart des pédoclimats français testés. Ce résultat est en accord avec les résultats expérimentaux observés par Dorsainvil (2002) et Dorsainvil et al. (2005) pour la levée des cultures intermédiaires.

Cette étude montre cependant aussi que selon les sites, et donc selon les types de conditions de milieu, des échecs importants de levée peuvent se produire. Leur fréquence peut être estimée : si ces échecs apparaissent bien dans les simulations, ils apparaissent relativement peu fréquents (sur la base des données explorées du climat passé). Toutefois, le site méditerranéen étudié paraît assez logiquement le plus fortement exposé, avec une année sur deux un taux de levée pouvant être inférieur à 75%. Dans ce cas, pour accroître les chances de succès de l'implantation, il est préférable de semer la culture intermédiaire au mois de septembre et d'utiliser des techniques de semis permettant d'enfouir les graines dans le sol, afin de réduire les stress hydriques létaux post-germination.

Pour ce qui est des simulations réalisées avec le modèle STICS, nous avons choisi d'initialiser les simulations pour analyser l'effet des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote, en utilisant une moyenne de 80% de plantes levées. Ce taux moyen élevé de plantes levées imposé n'empêche pas de forts stress hydriques réduisant très fortement la croissance post-levée et limitant le développement de la culture intermédiaire si l'eau et l'azote sont insuffisants. Une mortalité de la culture peut ainsi être simulée postérieurement à la levée en cas de stress hydrique très fort sur la plantule, par une sénescence prématurée des feuilles entraînant la mort de la plante.

Références bibliographiques citées

- Brunel B., Teulat-Merah M.H., Wagner T., Huguet J.M., Prosperi, Dürr C. (2009). Using a model-based framework for analysing genetic diversity during germination and heterotrophic growth of *Medicago truncatula*. *Annals of Botany* 103: 1103-1117.
- Carrera A., Dürr C. (2004). Utilisation du modèle SIMPLE (SIMulation of PLant Emergence) : analyse fréquentielle des cinétiques et taux de levée simulés de betterave, blé et CIPAN. Compte-rendu des travaux réalisés dans le cadre de la Convention Inra-ITB-ITCF 2003. 25 p.
- Dürr C., Aubertot J.N., Richard G., Dubrulle P., Duval Y., Boiffin J. (2001). SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 414-42.
- Dorsainvil F. (2002). Evaluation par modélisation de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture. Thèse Docteur Ingénieur INAPG. 124 p.
- Dorsainvil F., Dürr C., Justes E., Carrera A. (2005). Characterisation and modelling of white mustard (*Sinapis alba* L.) emergence under several sowing conditions. *European Journal of Agronomy*, 23, 146-158.
- Van Genuchten M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892-898.