



HAL
open science

Développement d'un modèle de croissance des peuplements végétaux non cultivés en milieu viticole méditerranéen.

Alec Sicard

► **To cite this version:**

Alec Sicard. Développement d'un modèle de croissance des peuplements végétaux non cultivés en milieu viticole méditerranéen.. Biodiversité et Ecologie. 2020. hal-04808659

HAL Id: hal-04808659

<https://hal.inrae.fr/hal-04808659v1>

Submitted on 28 Nov 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



Mémoire de stage de Master 1ere année:

Développement d'un modèle de croissance des peuplements végétaux non cultivés en milieu viticole méditerranéen.

SICARD Alec

Avril 2020 à Août 2020

Tuteur de stage: Fabrice VINATIER, INRAE, UMR LISAH

Enseignant référent: Jean-Stéphane BAILLY, AgroParisTech, UMR LISAH

Etablissement d'accueil: UMR LISAH, Bâtiment 24, 2 place Pierre Viala, 34060, Montpellier cedex 1

Etablissements de formation: AgroParisTech, SupAgro Montpellier, et Université de Montpellier

Département: Sciences de la Terre et de l'Eau et de l'Environnement de Montpellier

Formation: Master Sciences de l'Eau: parcours Eau et Agriculture

Table des Matières

1. Introduction	4
2. Cadre de la mission et état d'avancement	6
2.1. présentation du laboratoire	6
2.2. Présentation de la mission	7
2.3. Etapes clefs pour répondre à la problématique	8
2.4. Etat d'avancement	9
3. Contexte géographique et réglementaire	10
3.1 Contexte géographique	10
3.2 Contexte réglementaire	12
3.3 Conclusion sur le contexte géographique et réglementaire	14
4. Etude bibliographique	15
4.1. Synthèse bibliographique	15
4.2 Modèles existants	17
4.2.1 Modèles de croissance végétale	18
4.2.2 Modèles mixtes	20
4.2.3 Modèle pour les fossés	23
5. Fonctionnement du modèle créé	24
5.1 Données d'entrée et de sortie	24
5.2 Les modules	25
5.2.1 Module de dormance	25
5.2.2 Module de germination	26
5.2.3 Module de croissance par poids sec	26
5.2.4 Module de croissance par LAI	27
5.2.5 Module de transfert de masse	27
5.2.6 Module de traitement du sol	27
5.2.6 Modifications pour les fossés	27
5.3 Conclusion sur le modèle	28
6. Prochaines étapes	29
7. Conclusion	30
Bibliographie	32
Annexes	37
Annexe 1: Organigramme du LISAH (https://www.umr-lisah.fr/?q=fr/content/organigramme)	37
Annexe 2: Répartition des climats sur la planète (Mayer, s.d.)	38

Annexe 3: Schéma conceptuel illustrant les différents termes des bilans hydriques et azotés dans la parcelle viticole enherbée (Garcia, 2018)	39
Annexe 4: Paramètres du modèle FlorSys (Gardarin et al, 2012)	39
Annexe 5: Equations de prédictions de traits et des paramètres du modèle FlorSys (Gardarin et al, 2012)	40
Annexe 6: Modèles conceptuels du modèle FlorSys (Gardarin et al, 2012)	41
Annexe 7: modèle conceptuel de WaLIS (Celette et al, 2010)	42
Annexe 8: Modèle conceptuel du modèle de M. Giraud (Giraud et al, 2020)	43
Annexe 9: Script du modèle de croissance végétal développé pour le LISAH	44

1. Introduction

L'agriculture occupe une place importante au coeur de la France. Elle s'insère dans le patrimoine du pays et lui permet de rayonner à l'étranger. La gastronomie et l'oenologie qui en dépendent directement sont de parfaits exemples de la contribution de l'agriculture à la culture française. De plus, le secteur agricole est un pilier de la croissance économique du pays. C'est en effet un secteur excédentaire pour le pays porté majoritairement par l'export de vins et spiritueux (L'agriculture française en quelques chiffres, 2019). La production viticole représente par ailleurs 15% de la production agricole française en valeur en 2017 pour seulement 3% de la surface agricole du territoire, elle représente donc une forte valeur ajoutée pour une faible utilisation des ressources (Chiffres clés, s.d.). "Les vins et spiritueux français sont les 2nd contributeurs à la balance commerciale [...] avec 12,7 milliards d'euros. Ils sont également les 1ers contributeurs à la balance commerciale pour l'agroalimentaire" (Chiffres clés, s.d.). Il est donc essentiel de préserver ce secteur.

Cependant, le secteur viticole fait aujourd'hui face à de nombreux défis. L'augmentation des températures ainsi que l'accès à l'eau seront des enjeux clés dans les années à venir, en particulier dans les vignobles méditerranéens (Hannah et al, 2013). L'eau joue en effet un rôle central dans la mitigation des effets du changement climatique en augmentant la résistance des vignes aux fortes chaleurs (Humbert, s.d.). Tous les vignobles n'ont cependant pas accès à l'irrigation, il est donc impératif de trouver des solutions pour maximiser l'utilisation de l'eau naturellement disponible, à travers la recharge d'eau verte dans les sols par exemple, dont les vignes dépendent en période de canicule.

Les milieux non productifs des paysages viticoles offrent des opportunités encore peu explorées d'assurer la préservation du secteur. En effet, les bandes enherbées, les inter rangs et les fossés agricoles sont des composants intégrales du parcours hydrique et des interactions sol-eau-plante sur lesquels nous pouvons aujourd'hui agir pour revitaliser la production (Fried, 2019). Ces milieux non-productifs contribuent à l'amélioration de la recharge en eau des sols et préviennent leur saturation. Tout en traitant les pollutions, ils permettent de

contribuer à la vitalité de la biodiversité dont les vignes profitent (Dollinger et al 2015; Fried, 2019). Ils permettent donc de répondre à la fois aux nouvelles exigences environnementales et aux besoins anthropiques tout en offrant des solutions efficaces pour répondre aux enjeux de demain.

Le LISAH, Laboratoire d'Étude des Interactions entre Sol, Agrosystème et Hydrosystème, a développé une expertise dans l'étude des flux d'eau dans les systèmes plantes-sols. Celle-ci se traduit notamment à travers le développement de modèles informatiques qui simulent ces flux (Fabre et al 2010). Le LISAH se spécialise aussi dans les questions de la gestion des vignobles et du devenir de la viticulture avec des équipes dédiées. Le sujet des risques actuels et futurs encourus par les vignobles y est donc minutieusement étudié.

Au cours d'un stage de 3,5 mois il a été proposé de modéliser les dynamiques d'interactions entre la croissance des peuplements végétaux non cultivés dans les linéaires agricoles, en particulier les inter-rangs et les fossés, et les flux d'eau verticaux et horizontaux en milieu viticole méditerranéen.

Ce rapport présentera en sept parties l'avancée de ce projet deux mois après son commencement. Nous verrons en premier lieu le cadre de la mission complété par une description plus précise de celle-ci ainsi que les étapes clés à sa réalisation. Suite à cela, nous présenterons le contexte scientifique, géographique et réglementaire de la mission. Enfin, nous établirons l'état de l'art actuel en modélisation de croissance végétal et de flux d'eau pour ensuite décrire l'état d'avancement du projet et les étapes suivantes avant de conclure ce rapport.

2. Cadre de la mission et état d'avancement

2.1. présentation du laboratoire

Le LISAH est issu de la fusion de deux unités de recherche à Montpellier en janvier 2003: l'équipe SHAM, Sol et hydrologie des Agrosystèmes Méditerranéens appartenant à l'Unité Mixte de Recherche Sol et Environnement de SupAgro et de l'Institut National de la Recherche Agronomique et de l'unité AMBRE, Analyse et Modélisation sur les Bassins versants anthropisés du Ruissellement et de l'Erosion appartenant à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). La direction du laboratoire est aujourd'hui en transition. J. MOLÉNAT est directeur de recherche à l'INRAE et responsable du laboratoire et J-S. BAILLY, enseignant-chercheur à AgroParisTech et responsable de l'équipe Structures spatiales et dynamiques des sols et des paysages cultivés du LISAH, prendra la suite de J. MOLÉNAT. L'organigramme du LISAH (avant la transition) est présenté en Annexe 1

Le LISAH a deux implantations principales, la première dans Montpellier (France) au campus de la Gaillarde de SupAgro, et la seconde à Tunis (Tunisie) au sein de l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT) et de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INGREF). Le laboratoire est actuellement structuré autour de trois équipes de recherche : "Eau et polluants en bassins versants cultivés", "Érosion et transport solide", "Organisation spatiale et fonctionnement des paysages cultivés". Cette structure sera modifiée suite à la transition de direction pour trois nouvelles équipes thématiquement plus équilibrées et répondant à une meilleure répartition du personnel: "Ressource en sol sous changements globaux", "Contaminants des sols et des eaux", "Ecohydrologie des agrosystèmes". Le stage est encadré par Fabrice VINATIER, CR INRAE, et animateur de la nouvelle équipe "Ecohydrologie des agrosystèmes" et Jean-Stéphane BAILLY.

La mission du LISAH est le développement de connaissances, de modèles et de formalismes permettant de mieux appréhender, comprendre, et prédire les enjeux liés à l'eau et au sol dans les paysages cultivés anthropisés. Elle est accomplie grâce à la mutualisation des compétences et des connaissances des équipes notamment pour les questions centrées sur l'hydrologie, l'agronomie, les sciences du sol, la pédologie, la cartographie, et l'écologie. La démarche scientifique du LISAH ainsi que son implantation géographique lui ont permis de

développer une expertise certaine pour répondre aux enjeux de la viticulture. Le laboratoire bénéficie de la proximité de plusieurs sites expérimentaux appuyant la recherche, notamment, celui du bassin élémentaire de Roujan dans le bassin versant de la Peyne. Largement dédié à la viticulture, ce bassin est équipé de dispositifs de mesure de flux de masses depuis 1992. Cette expertise et cet accès privilégié à des sites expérimentaux font du LISAH un laboratoire parfaitement équipé pour répondre à la problématique de ce mémoire de stage.

2.2. Présentation de la mission

De nombreux modèles de croissance végétale ont été développés pour mieux comprendre et intégrer nos connaissances sur l'écophysiologie des plantes, en relation avec son environnement. Ces modèles se basent sur des constantes phénologiques spécifiques à chaque culture qui sont soumises à des contraintes de stress hydrique, d'apports en nutriments et pilotés par des données climatiques journalières (Brisson et al, 2002). Leurs sorties sont généralement des variables agronomiques, comme la biomasse et le rendement, et environnementale, par exemple les pertes en eau et en nutriments. Récemment, et du fait de l'essor de l'agroécologie, de plus en plus de modèles de croissance végétale sont appliqués aux milieux mixtes que sont les prairies, les parcelles d'agroforesterie et les forêts, et intègrent plusieurs espèces en interaction (Malézieux et al, 2009). Ils étudient des processus propres aux peuplements plurispécifiques par exemple la compétition entre espèces pour la lumière ou l'eau, et génèrent des sorties spécifiques concernant la coexistence entre espèces, interception du rayonnement, etc... Leur application aux linéaires agricoles que sont les bandes enherbées, les espacements entre rangs de vignes (ci-après inter rang), les ripisylves et les fossés de recueil des eaux de pluie est encore insuffisamment exploitée au regard de leurs multiples impacts sur les transferts de masse verticaux (infiltration, évapotranspiration) et horizontaux (écoulement, ruissellement). Dans le contexte de la viticulture où les inter rangs ont traditionnellement été maintenus en sols nus, il est intéressant d'étudier l'impact que pourrait avoir un couvert enherbé sur les transferts de masses.

L'objectif principal du stage est de réaliser un modèle parcimonieux de simulation de la croissance végétale des linéaires (fossés et inter rangs) en milieu viticole méditerranéen en fonction des pratiques d'entretien. Ce modèle devra simuler la porosité des couverts aux transferts de masse.

2.3. Etapes clefs pour répondre à la problématique

L'objectif principal du stage se décline en plusieurs sous-objectifs. Tout d'abord, une étape de bibliographie permettra d'appréhender le contexte du modèle, l'état de l'art de la modélisation de croissance végétale et des transferts de masses en milieux cultivés ainsi que les limitations posées par l'équilibre entre simplification et réalisme du modèle. En effet certains modèles existants sont devenus trop complexes dû fait du réalisme que les auteurs ont voulu intégrer. Ces modèles requièrent un nombre de paramètres important pour pouvoir les utiliser. Ces derniers ne sont malencontreusement pas toujours accessibles et limitent donc à la fois l'utilisation et la diffusion du modèle. Bien que la simplification des dynamiques naturelles étudiées puissent pallier à cet enjeu en réduisant le nombre de paramètres nécessaires, celle-ci peut mener à des omissions de phénomènes essentiels à la compréhension des interactions des systèmes complexes étudiés (Vinatier et al, 2016).

L'étude bibliographique sera suivie de la création du modèle de croissance végétale et de transferts de masse sur le langage de programmation librement accessible R, de préférence en anglais. Il se basera sur les équations et l'état de l'art scientifique étudié lors de la lecture bibliographique. La sélection des équations et des modèles à utiliser se fera conjointement avec le maître de stage selon les besoins. Le modèle devra être générique pour répondre aux besoins de modélisation de croissance végétale et de transferts de masse en inter rang et dans les fossés pour un peuplement végétal pluri-spécifique.

Enfin, la création du modèle sera suivie par sa calibration grâce aux bases de données du LISAH et la base de données TRY (Kattge et al, 2011). Au cours de la phase d'implémentation/calibration du modèle, une attention particulière sera portée à la découpe du modèle en unités élémentaires (modules) indépendants qui échangent des variables. La robustesse et la cohérence de chaque module fera l'objet d'une étude spécifique. Cette période sera suivi par la rédaction d'un rapport assurant la pérennité du modèle et son transfert au reste des équipes du LISAH. Il sera notamment important de bien répertorier le fonctionnement de chacun des modules qui le composent afin de pouvoir les intégrer au

modèle openFLUID développé par le laboratoire pour modéliser les flux dans les paysages complexes.

2.4. Etat d'avancement

Tableau 1: Etat d'avancement

Mois	Avril			Mai				Juin				Juillet				Août		
Semaine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Mode de Travail	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>p</i>
<i>Tâche 1 : bibliographie</i>																		
<i>Tâche 2 : création du modèle</i>																		
<i>Tâche 3 : Calibration</i>																		
<i>Tâche 4 : Rédaction du rapport</i>																		

d : travail à distance, pp : présence partielle, p : présence fait: en rose ; à faire: en violet

Les quatre tâches principales décrites lors de la partie précédente sont répertoriées dans le Tableau 1: état d'avancement qui traduit l'état actuel du projet. Les trois premières lignes indiquent l'échelonnage du stage ainsi que le mode de travail anticipé. Les lignes suivantes représentent chacune une tâche critique pour l'avancée du projet et son niveau d'accomplissement. Les tâches accomplies sont indiquées en rose et celles que doivent encore être achevées en violet. Certaines tâches se superposent et sont menées à bien simultanément. Pour les tâches 1 et 2, cela est dû principalement aux aller-retour nécessaires entre mise en application et théorie lorsque des enjeux sont rencontrés lors de la création du modèle. Pour les tâches 2 et 3, les chevauchements sont principalement dûs aux corrections du modèle liées au processus de calibration.

3. Contexte géographique et réglementaire

3.1 Contexte géographique

Ce stage s'inscrit dans un contexte méditerranéen français. Les interactions qui seront simulées dans le modèle de croissance végétale et de transferts de masse dépendent de paramètres et de variables qui sont propres à ce contexte. Ce dernier est notamment caractérisé par un climat précis. Le climat peut être défini comme l'ensemble des circonstances atmosphériques et météorologiques qui caractérisent l'état moyen d'une région (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/climat/16534>). C'est un facteur déterminant de la présence de stocks et flux d'eau ainsi que de la croissance végétale (Prévot, 2019). Il est donc fondamental de comprendre les enjeux du climat méditerranéen afin de mieux cerner le contexte dans lequel s'inscrit le modèle développé lors de cette mission. En effet, les principes agronomiques sur lesquels il se repose sont à l'intersection de l'étude des transferts de masse et d'énergie régis par le climat (Prévot, 2019).

En France, on observe un climat méditerranéen dans le sud du pays, en bordure de la Méditerranée (Annexe 2). Ce climat présente des caractères stables d'une année à l'autre. Il est marqué par de fortes différences de température avec une amplitude de 17 degrés en moyenne entre Janvier et Juillet (Joly et al, 2010). Ce sont les étés chauds qui sont la cause de cette amplitude (Climat méditerranéen, s.d.). L'effet conjoint de la position au sud de la zone tempérée de ce climat et la radiation solaire puissante et régulière assure "une circulation atmosphérique anticyclonique dominante [...] surtout en été, ce qui explique l'absence de précipitations durant cette période" (*Connaître le climat méditerranéen et les enjeux du changement climatique*, 2017). Le relief et la Méditerranée jouent un rôle conjoint et régissent les précipitations dans la région (*Connaître le climat méditerranéen et les enjeux du changement climatique*, 2017). Ainsi "dès le début de l'automne et jusqu'au printemps [...] se produisent les « pluies cévenoles » et les averses orageuses parfois excessives capables d'apporter la quantité moyenne d'un mois de pluie en seulement une heure" (*Connaître le climat méditerranéen et les enjeux du changement climatique*, 2017). Bien que le cumul de précipitation est en moyenne de 630 mm par an, ce flux est distribué en moins de 100 jours (Joly et al, 2010; Prévot, 2019; Climat méditerranéen, s.d.).

La fragilité des écosystèmes de la zone climatique méditerranéenne les rendent particulièrement vulnérables aux perturbations liées aux changements climatiques (*Connaître le climat méditerranéen et les enjeux du changement climatique*, 2017). Ces régions peuvent aussi être considérées comme le laboratoire des conditions climatiques qui s'exerceront d'ici plusieurs décades sur le reste de la France. En effet, les régions Nord-Méditerranéennes risquent de développer un climat caractéristique du Sud de la Méditerranée avec des été plus chauds et des périodes de sécheresse plus longues. Le changement climatique aura donc un impact non-négligeable sur la croissance végétale de la région et par conséquent sur la viticulture (Prevot, 2019; Crabit, 2020). Les hivers en région méditerranéenne française subiront une baisse notable du nombre de jours de gel. De plus, une diminution significative du manteau neigeux et de sa durée d'emprise sera observé en dessous de 1800 mètres d'altitude. La réserve d'eau qu'il constitue sera donc sévèrement compromise et l'alimentation de certaines rivières pourra ne plus être assurée en saison chaude. Une gestion raisonnée des ressources d'eau sera donc cruciale au maintien des activités viticoles de la région. En été, les épisodes de canicules sont augmenteront en fréquence et en durée. L'effet conjoint de la baisse des précipitations estivales, de la diminution des stocks d'eau constitués en hivers, et de la chaleur imposeront de nouvelles contraintes à la flore ainsi qu'aux activités anthropiques (*Connaître le climat méditerranéen et les enjeux du changement climatique*, 2017). En méditerranée, les activités viticoles françaises sont concentrées dans des zones de basse altitude contrairement à celle des pays au sud de la méditerranée qui sont protégées des fortes chaleures par des implantations dans le hauteurs. Ces activités courent donc de grand risques en France en cas d'évolution du climat vers un climat sud méditerranéen (Chiffres clés, s.d.).

Dans ce contexte, la flore a dû s'adapter pour tirer parti d'inter-saisons pluvieuses qui remplissent les stocks d'eau verte (Prévot, 2020). Dans les inter rangs des vignobles, les conditions climatiques précédemment décrites se traduisent par la présence d'une végétation spécifique dont la composition est marquée par une forte saisonnalité (Fried, 2019). Lorsque ces milieux ne sont pas semés on retrouve principalement les plantes suivantes: *Convolvulus arvensis*, *Senecio vulgaris*, *Cirsium arvense*, *Geranium rotundifolium*, *Diploaxis erucooides* et *Sonchus oleraceus* dans les vignobles du Languedoc (Fried, 2019). Ces plantes ont évolués

pour répondre aux contraintes climatiques qui imposent une évapotranspiration potentielle de Penman (ETP) supérieure aux précipitations annuelles (Prévot, 2019). Cette ETP n'est que rarement atteinte par les plantes qui souffrent d'un stress hydrique considérable en été où l'évapotranspiration réelle atteint moins des deux tiers de l'ETP. Ce stress hydrique et les hautes températures diminuent la capacité des plantes adventices des inter rangs et des fossés à germer et croître. Dès juin, on peut observer une baisse des taux de germination des plantes d'inter rangs dans les vignobles méditerranéens (Paré, 2011). Assurer la recharge d'eau verte dans les vignobles est donc une nécessité absolue dans ce contexte. Une gestion appropriée de la croissance végétale dans les milieux non productifs permettrait de répondre à cette problématique.

3.2 Contexte réglementaire

Le contexte actuel de gestion qualitative et quantitative des ressources hydriques est encadré par un ensemble de lois françaises et européennes. Depuis 2006, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) établie par l'Union Européenne pour les pays membres souligne l'importance d'une gestion appropriée des eaux de surfaces et des eaux souterraines dans l'ensemble des pays membres (Parlement européen, 2006). La DCE fixe l'objectif de l'atteinte du bon état qualitatif et quantitatif des ressources hydriques dans tous les milieux. Cet objectif s'est traduit en plusieurs lois françaises notamment la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques en 2006 et les multiples plans Ecophytos démarrés en 2008. En tant que premier producteur agricole de l'UE, la France doit répondre aux enjeux de pollution par les pesticides et les intrants azotés et phosphatés posés par l'agriculture (Paré, 2011; L'agriculture française en quelques chiffres, 2019). La viticulture qui n'utilise que 3% des sols agricoles mais consomme 20% des pesticides en France est notamment ciblé par ces enjeux (Paré, 2011). Dans ce contexte, une réduction de l'utilisation des pesticides et des intrants ainsi qu'une meilleure gestion de leur application pour éviter les pertes, notamment par ruissellement, doivent être mis en place. De plus, d'un point de vue quantitatif, l'eau doit être utilisée de manière plus efficace et attribuée aux usages les plus productifs. L'agriculture est le premier consommateur d'eau en France mais ne contribue qu'à une fraction du Produit Intérieur Brut (PIB), son accès à l'eau peut se voir réduit dans le futur (L'agriculture française en quelques chiffres, 2019). Dans ce contexte l'Agence de la Transition Écologique (ADEME) est un appui pour les agriculteurs. Son projet de recherche SYSCLIM avec l'INRAE a permis par

exemple de mettre en avant des nouvelles pratiques pour une agriculture raisonnée moins gourmande en intrants (Colnenne-David et al, 2016). Les principes de l'agro-écologie ainsi promus sont bénéfiques aux terres agricoles et viticole qui voient leur capacité de rétention d'eau augmenter (Colnenne-David et al, 2016). L'amélioration de la gestion des milieux non productifs tels que les fossés, les bandes enherbées et les inter rangs correspondent aux principes de l'agro-écologie et participent aux améliorations susmentionnées.

Les principes de l'agro-écologie, bien qu'encouragés, ne peuvent pas tous être librement implémentés dans le paysage viticole français. Celui-ci est réglementé par les Appellations d'Origines Protégées (AOP) au niveau Européen qui se traduisent par les Appellations d'Origines Contrôlées (AOC) en France (AOP-AOC, IGP, AB... : les labels de qualité dans l'alimentation, 2019). Ces appellations exigent l'application de certaines pratiques dans les vignobles qui encadrent les pratiques d'exploitation et les aménagements paysagers (Dénominations de vins existantes – fiche technique, 2011). Les AOC sont régies par l'Institut National des Appellations d'Origine (INAO) dont les réglementations évoluent lentement (AOC et Paysages, 2006). L'INAO reconnaît depuis 2003 l'importance de la préservation des sols et de la biodiversité des terroirs pour préserver l'intégrité des vins menacées par la mécanisation, les traitements chimiques et le désherbage total par exemple (AOC et Paysages, 2006). Plusieurs propositions ont été faites pour maintenir la continuité de corridors écologiques grâce aux aménagements des parcours hydriques et le maintien de bandes enherbées et de haies en pourtour de parcelle (AOC et Paysages, 2006). Le maintien de l'enherbement dans les inter rangs est autorisé et ne bénéficie pas toujours de réglementations précises (AOC et Paysages, 2006; Dénominations de vins existantes – fiche technique, 2011). Néanmoins, l'effet bénéfique sur la pollution chimique et sur l'érosion des pratiques d'aménagement des milieux non productifs en général, sont reconnus. Ces pratiques permettent donc de répondre aux exigences des législations françaises et européennes tout en s'alignant avec les demandes de l'INAO sur le maintien de la biodiversité des terroirs français.

Dans ce contexte de maintien de biodiversité, il est essentiel de s'intéresser aux possibilités offertes par les milieux agricoles non productifs pour répondre aux exigences susmentionnées et aux objectifs de maintien de la Trame verte et bleue (TVB) fixé par le Grenelle de

l'environnement en 2007 (<http://www.trameverteetbleue.fr>). “La trame verte et bleue est un réseau formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques identifiées par les schémas régionaux de cohérence écologique [...] [la] Trame verte et bleue contribue à l'amélioration de l'état de conservation des habitats naturels et des espèces et au bon état écologique des masses d'eau” (<http://www.trameverteetbleue.fr>). A travers la TVB, le gouvernement reconnaît l'importance de l'agriculture dans le maintien de la qualité de l'environnement et des corridors écologiques. L'enherbement des inter rangs est par ailleurs reconnu comme moyen essentiel de lutte contre l'érosion par ruissellement, et donc d'amélioration de l'infiltration de l'eau dans les sols, de maintien de la biodiversité, de la qualité des eaux et des services écosystémiques dont l'agriculture peut ensuite bénéficier (<http://www.trameverteetbleue.fr>).

3.3 Conclusion sur le contexte géographique et réglementaire

Les enjeux climatiques énoncés dans l'étude du contexte géographique auront sans aucun doute un impact direct sur la biodiversité et sur la production viticole en région méditerranéenne française. Les enjeux économiques et écologiques y sont donc importants. Dans ce contexte de menace, la valorisation des pratiques de maintien de biodiversité, d'amélioration de la qualité des eaux et des sols en agriculture tels que l'entretien des enherbements spontanés dans les inter rangs et les fossés des vignobles est essentiel. Cette valorisation peut passer par l'étude des bénéfices de ces pratiques sur la productivité et sur l'économie. En effet, ces pratiques permettent une amélioration de la recharge hydrique des sols et de leur productivité. Ces pratiques sont par ailleurs libres de contraintes réglementaires sur les appellations et encouragées par la législation française, à travers les lois concernant la TVB, et européenne à travers la DCE.

4. Etude bibliographique

Les contextes réglementaire, économique et climatique qui impactent la viticulture présentés jusqu'ici forment le socle sur lequel le modèle de croissance végétale et de transfert de masse a été construit. Dans cette section, nous présenterons d'abord de manière plus approfondie le potentiel des couverts enherbés en inter rang et en fossés de remédier à ces enjeux et l'intérêt de la modélisation pour comprendre les divers impacts que ce couvert peut avoir. Puis, nous étudierons les modèles existants desquels les équations et processus représentés dans notre modèle ont été tirés.

4.1. Synthèse bibliographique

Il a été démontré que “le fonctionnement des paysages cultivés est fortement soumis au facteur anthropique” (Paré, 2011). Dans ce contexte nous avons la possibilité d'améliorer les pratiques culturales et mettre en place des paysages fonctionnels pour répondre aux enjeux de préservation écologique, de prévention des pollutions, et de productivité. En effet, les pratiques agricoles “ont des conséquences diverses qui impliquent les ressources en eau et en sol, en quantité comme en qualité”, ainsi que la production de biens (Paré, 2011). Il est donc impératif de prendre en compte conjointement les processus décisionnels humains, qui se traduisent par des itinéraires techniques en agriculture, et les processus biogéochimiques. Les milieux agricoles non productifs dépendent directement de ces pratiques (Gardarin et al, 2012; Garcia, 2018). Les intérêts économiques et écologiques de l'étude des dynamiques de croissance végétale et de transferts de masse dans ces milieux sont donc nombreux. En effet, ces milieux permettent l'application de solutions suggérées par l'agro-écologie (Garcia, 2018). Un des principes de cette dernière est le remplacement des intrants de synthèse “ par des processus réalisés par les organismes des agrosystèmes, et permettant de satisfaire les objectifs de production de manière durable” (Garcia, 2018).

Dans les vignobles, cela peut se traduire par un enherbement semé ou spontané des inter rangs, des pourtours de la parcelle et des fossés (Garcia, 2018). Celui-ci doit cependant être maîtrisé pour ne pas nuire aux activités viticoles (Mona, Garcia, 2018). En effet, ce n'est pas

l'équilibre entre deux pratiques antagonistes qui est recherché mais bien l'amélioration des pratiques existantes grâce à l'introduction de nouvelles méthodes renforçant la pérennité des activités anthropiques, dans notre cas de la viticulture. Par exemple, le maintien de biodiversité en agriculture a le potentiel de réguler les cycles biogéochimiques tels que le cycles des nutriments, notamment celui de l'azote qui est aujourd'hui un enjeu émergent, la fixation de carbone, et l'immobilisation et la dégradation des polluants par les organismes (Héry, 2019). L'azote, un intrant crucial pour la production végétale, se raréfie et des méthodes alternatives d'ajout d'azote doivent être développées. Parmi ces dernières, l'utilisation de légumineuses fixatrice d'azote et l'enfouissement de couvert enherbés offrent des pistes prometteuses (Garcia, 2018; Héry, 2019). Les capacités des organismes à immobiliser les polluants répondent quant à eux aux demandes étatiques d'amélioration de la qualité des cours d'eau en évitant la lixiviation des intrants vers les nappes d'une part et leur ruissellement vers les cours d'eau d'autre part (Paré, 2011). En effet, dans le Sud de la France, les inventaires régionaux de la qualité de l'eau réalisés en 1997 et 1999, ont montré que plus de 65% des eaux de surface et 80% des eaux souterraines sont contaminées par des pesticides (Agence de l'eau RMC, 1998 et 2000). Plus de 50% des matières actives retrouvées sont des molécules d'herbicides. L'agriculture joue donc un rôle majeur dans cette problématique. Les pratiques viticoles ont un impact non négligeable sur la pollution puisque 20% de la consommation annuelle française de pesticides peut lui être imputée pour seulement 3% de la surface agricole française (Paré, 2011).

Le besoin de répondre aux enjeux environnementaux en viticulture peut paraître antagoniste aux besoins de maintien de la productivité des vignobles dont une portion non négligeable des exports français dépendent. En effet, la perte de rendement effraie les viticulteurs (Garcia, 2018). Un couvert végétal en inter rang a un impact non négligeable sur les bilans hydriques et azotés. Les espèces le composant peuvent être concurrentielles avec la vigne, la disponibilité de l'eau et de l'azote peut être compromise pour la vigne aux étapes clefs de sa croissance (Garcia, 2018). De plus, la réduction de la quantité d'eau dans le sol en cas de forte évapotranspiration par le couvert d'inter rang peut nuire à la minéralisation de l'azote. Grâce à un entretien approprié du couvert, il est possible qu'au contraire le couvert puisse améliorer l'infiltration de l'eau en hiver, soutenu en particulier par les réseaux hydrographiques des fossés, restituer de la matière organique et de l'azote au sol grâce à

l'enfouissage au printemps qui évite en même temps la compétition minérale et hydrique avec la vigne (Paré, 2011; Fried, 2019; Giraud et al 2020). De plus ce couvert permet de diminuer l'érosion en hivers lors des pluies orageuses du climat méditerranéen et réduit le risque de lixiviation. Cela permettrait en théorie le maintien de la production viticole et la réduction des pollutions (Garcia, 2013; Garcia, 2018). Ce fonctionnement est illustré en Annexe 3. Le modèle développé pour la mission au LISAH a pour but d'évaluer la croissance végétale du couvert d'inter rang et de la vigne en fonction de bilan hydrique, calculé en interaction dynamique avec la croissance végétale, et du bilan azoté entré en paramètre fixe.

Il est intéressant d'utiliser la modélisation pour comprendre les impacts de changement de pratiques agricoles, i.e. d'itinéraires techniques, car ces derniers permettent d'étudier en isolation les effets de nombreux paramètres (Paré, 2011). Les modèles et les simulations sont de puissants outils à cet effet. En agriculture, les modèles permettent aussi de transmettre aux producteurs des résultats probables issus de processus complexes. Ce sont à cet effet des outils d'aide à la décision (Gardarin et al, 2012). Dans des contextes où les pratiques agricoles doivent évoluer rapidement pour répondre à des contraintes législatives, environnementales, productives et climatiques, il est essentiel de disposer d'outils d'appui opérationnels et pédagogiques (Duru et al, 2010). L'expérimentation in situ requiert un niveau d'investissement en temps et en argent qui n'est pas soutenable pour suivre la vitesse de changement des exigences et peut compromettre la production agricole surtout si elle s'opère en ferme ou vignoble. Les modèles et les simulations, qualifiés d'expérimentation in silico, peuvent être considérés comme des voies complémentaires et permettent de "constituer des référentiels en un temps réduits" (Duru et al, 2010). Ils permettent de remplir des fonctions de diagnostic des potentiels de production et d'aide à la décision en remplaçant l'expérimentation (Duru et al, 2010). C'est donc dans ce but que le modèle de ce stage a été construit.

4.2 Modèles existants

Parmi les modèles étudiés pour construire le modèle de croissance végétale et de transfert de masse, trois prennent en compte les interactions de ces deux éléments. Les autres se focalisent sur la croissance végétale avec les éléments hydrauliques utilisés comme

paramètres d'entrée. La complexité de représentation de chacun de ces éléments est un facteur limitant de leur modélisation qui peut déjà demander de nombreux paramètres d'entrée pas toujours disponibles pour les utilisateurs, à l'instar du modèle FlorSys (Gardarin et al, 2012). L'inclusion simultanée de la croissance végétale et des transferts de masse exige donc des simplifications par rapport aux modèles qui ne représentent qu'une seule de ces dynamiques. Nous explorerons d'abord les modèles de croissances végétales avant de décrire le fonctionnement des modèles mixtes et du modèle focalisé sur les fossés agricoles.

4.2.1 Modèles de croissance végétale

Le premier modèle étudié est directement issu de plusieurs travaux de l'équipe de Michel Duru chercheur à l'INRAE (Duru et al, 2009). Ce modèle permet de simuler la production de l'herbe dans les pâturages afin de maximiser leur rendement. Un second modèle de croissance végétale, dénommé FlorSys, a été exploré, celui-ci est particulièrement précis dans la modélisation des processus de germination et d'émergence des plantes adventices en milieu agricole (Gardarin et al, 2012). Afin de simplifier la modélisation de la croissance végétale ces modèles se basent sur l'utilisation des types fonctionnels des plantes qui dépendent de traits caractéristiques des espèces. Un trait est "caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique héritable et mesurable au niveau de l'individu, de la cellule à l'organisme dans son ensemble, sans référence à l'environnement ou à d'autres niveaux d'organisation" (Garcia, 2018). Les types fonctionnels sont des regroupements de plusieurs espèces de plantes en une seule catégorie dont la réponse aux procédés culturaux, tels que la gestion des sols, et dont les caractéristiques agronomiques sont similaires, les plantes d'un même type partagent donc des mêmes traits (Duru et al, 2009).

Le modèle FlorSys pose les bases du fonctionnement de la germination et de l'émergence des plantes en relation avec les pratiques culturales. Les facteurs pris en compte sont nombreux, le sol y est découpé en trente tranches d'un centimètre pour lesquelles la texture, structure, l'humidité et sa température parmi d'autres paramètres doivent y être précisés. Plusieurs de ces paramètres sont sensibles aux pratiques culturales telles que le labour ainsi que les passages de machines lourdes qui compactent le sol. De nombreux paramètres concernant les espèces végétales doivent aussi y être inclus (Annexe 4). Du fait de leur nombre important et de l'absence d'information sur chacune des espèces dans la littérature scientifique, les auteurs

ont souhaité développer une méthode d'estimation de ces paramètres reportée en Annexe 5. Le modèle FlorSys utilise ces paramètres pour calculer chaque jour la proportion de graines germées, de plantes émergentes et la mortalité des plantes à chacun de ces stades de développement. Les processus utilisés dans FlorSys sont complexes. Par exemple, pour la germination le modèle prend en compte les processus de mortalité des graines due au vieillissement, aux maladies et à la prédation, la dormance primaire et secondaire, la profondeur d'enfouissement, l'exposition antérieure à la lumière et le potentiel hydrique du sol. Nous rappelons que la dormance se définit comme un état latent dans lequel les graines peuvent rester en attendant les conditions idéales de germination (Bradford, 2002). Ce modèle est cependant trop complexe pour être intégré dans le nôtre. D'autres modèles proposent des processus plus simples de germination et d'émergence. Cependant, l'idée de découpe du sol et de l'impact des pratiques culturales sur les propriétés du sol sera retenue pour les calculs liés aux modules hydriques tirés du modèle WaLIS (Celette et al, 2010).

Le modèle de Duru et al. (2009) se focalise principalement sur la croissance du Leaf Area Index (LAI), un indice de la surface foliaire qui s'exprime en mètre carré de feuilles par mètre carré de sol. Ce modèle se base sur l'étude des sources de croissance car la morphogenèse est selon les auteurs trop peu comprise. Pour ce faire, le modèle calcule la sénescence et la croissance du LAI chaque jour en fonction des paramètres d'interception des radiations photosynthétiquement actives (PAR), de nutrition azoté et de la disponibilité en eau. Ces deux derniers paramètres sont ajoutés en entrée du modèle en tant qu'indices. Ceci représente une des faiblesses de ce modèle qui nécessite de connaître en avance les propriétés du sol. La production végétale en LAI est ensuite convertie en poids sec de plante. Les méthodes exposées dans ce modèle sont reprises dans deux des modèles mixtes, Herb'Sim et WaLIS, qui seront présentés et sont inclus dans le modèle développé pour le LISAH (Duru et al, 2009; Celette et al, 2010; Duru et al, 2010).

Parmi les processus présentés dans les modèles de croissance végétale, plusieurs éléments ont été retenus pour élaborer notre modèle. La sélection des éléments à conserver s'est basée sur un besoin de simplification du modèle afin d'éviter l'utilisation d'un trop grand nombre d'hypothèses qui pourraient agir en défaveur de sa précision. Le modèle FlorSys, très complexe et basé principalement sur les hypothèses issues des PFT, bien que très utiles, n'a

donc que peu été utilisé. Par contre, la compartimentation du sol pour faciliter les calculs, qui sera par ailleurs reprise dans un des modèle mixte, est un élément essentiel du modèle élaboré pour ce stage. Ensuite, l'utilisation des sources de croissance pour le calcul du LAI en fonction du PAR et de la nutrition a aussi été retenue pour le modèle. En effet, ces paramètres présentent une méthode simple du calcul de la croissance des plantes qui nécessite que peu de paramètres d'entrée. Le modèle de Duru et al. introduit aussi une formule de calcul du PAR = $0.48 * \text{Rayonnement Global Incident}$, qui peut être introduit dans notre modèle en cas d'absence de ce paramètre (Duru et al, 2009).

4.2.2 Modèles mixtes

Trois modèles mixtes, dans lesquelles les dynamiques de transfert de masse et de croissance végétale sont en interactions, ont été développés (références à indiquer). Le modèle Herb'Sim est issu des premiers travaux de M. Duru précédemment présenté. Ce modèle améliore le précédent en incluant les processus d'infiltration de l'eau. La disponibilité en nutriment reste cependant un paramètre d'entrée. Il découpe la production végétale en trois sections. La production potentielle permise par le climat, la production réalisable permise par la nutrition azotée et par la disponibilité en eau, et la production actuelle dépendante des pratiques culturales. Cette différenciation sera par ailleurs utilisée dans notre modèle. Ce modèle est aussi séparé en deux modules distincts, un module sol grâce auquel les disponibilités en eau sont calculées et un module plante qui assure les calculs de croissance végétale permise par le climat, l'interception des PAR et de la sénescence des plantes qui seront aussi inclus dans notre modèle. Les relations mathématiques et chimiques sur lesquelles est construit le modèle sont les suivantes. L'interception de la lumière augmente de façon asymptotique selon l'augmentation du LAI et le LAI augmente avec la température. De plus, la disponibilité en eau, azote et phosphate impacte directement le développement du LAI et la conversion de lumière en biomasse mais n'ont que peu d'impact sur le passage des stades phénologiques. Le modèle de Herb'Sim porte une attention certaine sur le passage des stades phénologiques et sur la répartition de la biomasse entre les tiges et les feuilles. Ces processus là ne seront pas pris en compte dans notre modèle. Une des hypothèses essentielles de ce modèle est que la répétition des mêmes pratiques d'entretien du sol dans le long terme mène à une stabilité de la répartition des espèces végétales dans la parcelle étudiée. Cette hypothèse leur permet de ne pas simuler la germination des plantes (Duru et al, 2010).

Le modèle développé pour la thèse de N. Paré permet de modéliser à la fois les processus de germination, les processus de croissance végétale basés sur le gain de poids sec des plantes et les processus de transferts de masse basé sur le modèle MHYDAS développé par le LISAH (Moussa et al, 2002). Ce dernier permet de simuler les transferts de masses au niveau du bassin versant et fut originellement utilisé pour étudier la contribution des pratiques culturales sur la genèse des inondations. Il a donc été adapté pour l'utilisation du modèle de N. Paré au niveau de la parcelle. Ce modèle est aussi spécifique aux vignobles. Par rapport aux autres modèles qui se rapportent majoritairement à la croissance du LAI, le modèle de Paré permet de modéliser la croissance végétale avec des paramètres d'entrée différents tous mesurables empiriquement. Par exemple, le poids sec à l'émergence, l'efficacité d'interception du rayonnement et la température minimum pour la gain de poids sec. Ce modèle est construit sur le modèle de conductance, avec des gains calculés en degrés jours, de Benjamin et Parks et de Scaife et al (Scaife et al, 1986; Benjamin et Park, 2007). Un enjeu de cette méthode est cependant l'utilisation d'une sénescence soudaine des plantes au lieu d'une sénescence progressive. Une autre limitation de cette méthode est la non-prise en compte de la disponibilité en eau comme facteur limitant. La germination et l'émergence des plantes, quant à elles, sont dépendantes du temps hydrothermal écoulé depuis la fin de la dormance tiré des études de Bradford (Bradford, 2002). Tout comme le modèle Herb'Sim, ce modèle considère que la composition végétale est similaire d'une année à l'autre, la mortalité n'y est donc pas calculée. La dormance prend fin selon des paramètres définis dans la littérature, notamment les précipitations en automne, le début du printemps et la température pour la remise en dormance en juin. Cette méthode simplifiée permet de calculer le nombre de plantes germées et leur date d'émergence sans prendre en compte des paramètres tels que la structure du sol ou la prédation. Elle sera donc utilisée dans le modèle développé pour ce stage. Le modèle de Paré prend aussi en compte l'impact des pratiques d'entretien sur le couvert végétal de l'inter rang. Pour ce faire, le modèle converti le poids sec de plante calculé en LAI. Ce LAI est ensuite remplacé à un LAI résiduel suite à l'application d'un traitement chimique ou d'une tonte. Dans ce modèle, une tonte a un effet direct sur le LAI alors qu'un délai de 25 jours est appliqué à un traitement herbicide post levée qui empêche aussi la germination pendant cette période. Un traitement herbicide pré levée a pour effet d'empêcher toute germination pendant 140 jours (Paré, 2011).

Le troisième modèle étudié est le Water bAlance for Intercropped System (WaLIS). Ce modèle est spécifique aux vignobles, son modèle conceptuel est reporté en Annexe 7. Le sol y est divisé en deux compartiments distincts, un de surface et un autre plus en profondeur. Dans le premier compartiment les racines des plantes d'inter rang et des vignes puisent toutes deux des ressources alors que seules les racines des vignes explorent le second compartiment. Cette distinction permet de calculer avec plus de précision la quantité d'eau disponible pour les vignes. La séparation des précipitations entre ruissellement et infiltration est basée sur la méthode des Curve Numbers développé par le Soil Water Assessment Tool. Cette méthode permet de calculer la ratio d'infiltration selon plusieurs paramètres tels que la couverture végétale, le travail préalable du sol, la texture et la composition du sol. D'autres études sur WaLIS suggère que la méthode des Curve Numbers est trop controversée et qu'il peut être plus pertinent d'utiliser le coefficient conductivité à saturation, lui aussi dépendant de l'état du sol, pour calculer le ratio d'infiltration (Garcia, 2013). Il a été jugé plus pertinent dans notre cas d'offrir aux usagers du modèle le choix de la méthode. Dans WaLIS, l'eau dans chaque compartiment est ensuite soumise à plusieurs calculs dont la quantité maximale d'eau que celui-ci peut contenir, la quantité réelle présente, la fraction transpirable par les plantes chaque jour selon le couvert végétal, les conditions climatiques, et la quantité drainée. Les transferts de masse horizontaux ne sont plus pris en compte une fois l'eau infiltrée. Pour la croissance végétale, le modèle WaLIS se base sur des processus similaires à ceux développés dans Herb'Sim avec un calcul journalier de la croissance et de la sénescence qui permet de trouver le LAI total par plante. Ces paramètres sont affectés par la quantité d'eau disponible donnée grâce aux calculs de transferts de masse, la disponibilité en azote définie comme paramètre d'entrée pour le modèle, la température et le PAR. La sénescence des tiges des plantes n'est par contre pas calculée dans ce modèle. Les vignes et le couvert de l'inter rang sont soumis aux mêmes contraintes et calculs de croissance, la seule différence notable est que la vigne puise ses ressources en eau dans deux compartiments de sol (Celette et al, 2010).

Les trois modèles mixtes présentent chacun des processus intéressants pouvant être inclus dans le modèle final développé pour le LISAH. Les similarités de calcul de croissance végétal du modèle Herb'SIM et WaLIS nous permettent de n'utiliser que ce dernier dont le script est accessible. Le modèle de Paré offre une méthode de calcul alternative pour la

croissance végétale avec des paramètres différents. Il est donc utile de l'intégrer dans le modèle final afin de pouvoir comparer les résultats de ces deux modèles d'une part et permettre aux utilisateurs d'utiliser l'une ou l'autre méthode selon les données à leur disposition. En ce qui concerne les transferts de masse, seul le modèle WaLIS présente une modélisation dédiées aux milieux viticoles qui n'a pas besoin d'être adapté contrairement au modèle MHYDAS (Celette et al, 2010; Pare, 2011). Le modèle WaLIS a donc entièrement été utilisé dans la création de notre modèle avec les modifications proposées par L. Garcia et la méthode de calcul de croissance végétale de Paré ajoutée en option pour l'utilisateur.

4.2.3 Modèle pour les fossés

Le modèle étudié pour la représentation des flux et de la croissance végétale dans les fossés est celui de M. Giraud et al (2020). Il fut développé pour étudier l'impact de l'entretien des fossés agricoles sur la répartition des espèces végétales et leur propagation vers de nouveaux fossés. Son modèle conceptuel est en annexe 8. C'est un modèle complet qui simule à la fois les transfert de masse horizontaux et la croissance végétale en fonction des pratiques d'entretien. Ces dynamiques sont séparées en deux modules distincts. Les fossés de recueils reçoivent une forte concentration d'eau qui, lors de pluies abondantes, peuvent avoir une vitesse considérable. Ces effets peuvent changer les dynamiques de sénescence et de pousse des plantes et doivent être inclus dans la modélisation. Ce modèle se focalise sur les plantes recouvrant le fond des fossés, parfois immergés, et non les plantes recouvrant les côtés. Ces plantes du fond des fossés sont assimilés à des trapèzes afin de faciliter les calculs de leur effet sur le transfert horizontal. Afin de modéliser leur croissance, le modèle se base sur le calcul de la croissance du LAI en fonction du gain de poids sec. Cette méthode est similaire à celle de Paré mais ne comprend pas de facteur d'efficacité d'interception. Dans le but d'inclure la croissance végétale des bords des fossés, il sera sans doute nécessaire d'adapter le modèle WaLIS en changeant la valeur des CN par exemple et en prenant en compte un effet d'ombrage plus important. De nouvelles hypothèses et équations seront sans aucun doute nécessaires à l'adaptation du modèle WaLIS. Il faudra par exemple prendre en compte les enjeux de l'hydromorphie dans les fonds des fossés. En plus des pratiques d'entretien incluses dans le modèle de N. Paré, ce modèle ajoute celle du brûlis des fossés, cet ajout sera très intéressant à inclure dans le modèle final (Giraud et al, 2020).

5. Fonctionnement du modèle créé

Le modèle créé pour répondre à la problématique du stage doit répondre à plusieurs exigences. Tout d'abord, il doit pouvoir être intégré à la plateforme OpenFLUID du LISAH. Pour satisfaire cette demande, le modèle doit pouvoir être facilement adaptable à d'autres langages de programmation et être décomposable. Le modèle est donc organisé en sept modules principaux eux-même découpés en sous-modules. Ces derniers permettent de séparer les calculs de dormance, germination et émergence (ci-après germination), croissance par calcul du poids sec, croissance par calcul du LAI, de transfert de masse sur la parcelle et dans les fossés. Ces modules s'imbriquent dans une boucle "for" grâce auquel le modèle parcourt chaque jour. Chaque module a des paramètres indiquant les jours auxquels les algorithmes qu'il contient doivent être utilisés. Le modèle doit aussi permettre la prise en main la plus intuitive possible. C'est pourquoi les utilisateurs pourront choisir la méthode de calcul de croissance végétale et celle de calcul de transferts de masse. Finalement, le but du modèle est de servir d'appui aux décisions d'enherbement des inter rangs ainsi que de comprendre l'impact de cet enherbement sur les transferts des masses dans les parcelles et les fossés. Afin de comprendre la construction du modèle nous verrons d'abord dans cette partie les données d'entrée et de sortie du modèle, le fonctionnement de chaque module sera ensuite détaillé. Les scripts complétés du modèle sont inclus dans l'annexe 9.

5.1 Données d'entrée et de sortie

Afin de fonctionner, le modèle nécessite plusieurs données d'entrée toutes transmises sous format CSV. Toutes les données de températures doivent être en degré Celsius, les données de poids en grammes, les données de quantité d'eau en millimètre, de potentiel hydrique en mégapascal, de rayonnement en Watt par mètre carré, et de surface en mètre carré. Le premier fichier doit inclure les données climatiques. Celles ci sont: les jours durant lesquels le modèle doit tourner, sous format YYYY-MM-DD, le premier jour doit être le 1er septembre, le dernier doit être le 31 août de l'année suivante; les précipitations chaque jours; la température chaque jour; le rayonnement incident et si possible la par du rayonnement photosynthétiquement active, si cette information n'est pas disponible le PAR sera calculée suivant la formule de Herb'Sim (Duru et al, 2010). Un second fichier doit contenir les

informations sur les plantes avec le nom de chaque espèce; le nombre moyen d'individu de cette espèce, leur saison de croissance (automne, printemps ou les deux), le temps hydrothermal, la température de base du sol pour la germination; la température de base pour la croissance post émergence; la température du sol minimum pour atteindre 50% de germination; la teneur en eau minimum dans le sol pour atteindre 50% de germination; l'écart type de cette teneur minimum au sein d'une même espèce, le Leaf Area Ratio (LAR) qui permet de convertir le poids sec en LAI, le poids sec à l'émergence, et si possible, la constante allométrique, le coefficient d'interception de la lumière, le facteur de croissance relative qui permet de calculer la croissance permise par les degrés jours écoulés le facteur de pondération de l'effet de la lumière par rapport à celui de la température pour la croissance, le temps de vie d'une feuille, et la vitesse de croissance des feuilles. Avoir toutes ces données permettrait d'utiliser les deux modèles de croissance. Un troisième fichier devra contenir les données d'assolement en mètre carré pour les vignobles, la quantité maximum dans chaque compartiment du sol, le LAI résiduel après un traitement chimique ou une tonte, le LAI maximum toléré avant le déclenchement d'un traitement ou d'une tonte dans les inter rangs ou les fossés si nécessaire, et les dates de chaque traitement ou tonte si nécessaire. Le fichier contenant les informations nécessaires aux calculs de croissance végétal et transfert de masse dans les fossés n'a pas encore été défini.

Les sorties du modèle seront des graphiques et des tableaux. Les graphiques permettront de visualiser les données des tableaux. Ces données seront le nombre de graines germées et les dates de germination, les dates de fin et de remise en dormance, la croissance de chaque cohorte au fil du temps, une cohorte est définie comme toutes les plantes germées le même jour, l'évolution du LAI total dans les fossés, les rangs et les inter rangs, l'ETR et l'ETP chaque jour, ainsi que l'évolution du stock total d'eau dans le sol.

5.2 Les modules

5.2.1 Module de dormance

Le module de dormance est basé entièrement sur le modèle utilisé par N. Paré. La dormance est activée par défaut dès le début de la simulation. En automne la dormance des graines des plantes actives à cette période prend fin si 36 mm de pluie sont cumulés en 48 heures. La

dormance des graines des plantes d'automne se réactive lorsque que celle des graines de printemps prend fin, le 1 février. La dormance des graines de printemps se réactive si 25 degrés en moyenne sont atteints ou dépassés en 48 heures à partir du premier juin. Lorsque la dormance prend fin, deux informations sont ajoutées aux données du couvert végétal, la quantité de graines non dormantes pour chaque espèce égale au nombre de plantes de chaque espèce normalement observées sur la parcelle ou dans le fossé et la quantité restante de graines non dormantes qui sera diminuée au fur et à mesure que les graines germent.

5.2.2 Module de germination

Le module de germination est lui aussi basé sur le modèle utilisé par N. Paré. La germination dépend du temps hydrothermal écoulé et le nombre maximum de graines germées pour chaque espèce est égale au nombre moyen de plantes de chaque espèce normalement observées sur la parcelle ou dans le fossé. Le calcul de germination utilise le probit de la germination donnant donc chaque jour le nombre de graines germées. Ce module contient aussi un module de vérification de la validité du temps hydrothermal choisit qui peut être utilisé pour déduire un temps hydrothermal pour une espèce de plante pour laquelle cette information ne serait pas disponible à condition de connaître la température du sol minimum pour atteindre 50% de germination. Cette vérification est bâtie sur le constat de la similarité inter-espèce du ratio du temps hydrothermal par rapport à cette température. Le calcul du ratio moyen permet ensuite de calculer un temps hydrothermal approprié.

5.2.3 Module de croissance par poids sec

Le module de croissance par calcul du gain de poids sec est basé sur le modèle de Benjamin et Parks que N. Paré a utilisé pour bâtir son modèle (Benjamin et Park, 2007). Cette méthode utilise les degrés-jours écoulés pour calculer le gain en poids sec. C'est un modèle de conductance c'est à dire que "la conductance équivalente à la combinaison ne peut excéder le plus petit des deux composants" qui sont la température et le PAR (Paré, 2011). Dans cette méthode on calcul d'abord le logarithme naturel du gain de poids sec qui est ensuite converti en poids sec. Le LAR permet ensuite de convertir ce poids sec en LAI. Cette méthode prend en compte les effets d'ombrages des feuilles, l'efficacité d'interception et de conversion en biomasse, la température et le PAR. Contrairement au modèle de N. Paré, un effet d'ombrage moyen est calculé par rapport à la quantité et à la taille de plante germées, cet effet

d'ombrage est ensuite appliqué à la croissance de chaque cohorte. Ce changement fut appliqué en accord avec le maître de stage dû au caractère pluri-espèces de notre modèle.

5.2.4 Module de croissance par LAI

Le module de croissance par calcul de gain de LAI est tiré du modèle WaLIS. Ce module n'est pas encore complété dans le modèle. Afin de pouvoir l'intégrer dans notre modèle, les fonctions du modèle WaLIS doivent être décomposées en boucles "for" afin de les rendre plus modulables.

5.2.5 Module de transfert de masse

Le module de transfert de masse est tiré aussi du modèle WaLIS. Ce module n'est pas encore complété dans le modèle. Afin de pouvoir l'intégrer dans notre modèle, les fonctions du modèle WaLIS doivent être décomposées en boucles "for" afin de les rendre plus modulables.

5.2.6 Module de traitement du sol

Le module de traitement du sol est basé sur les hypothèses utilisées par N. Paré. Les plus importantes sont que le traitement par herbicide post levée a un délai de 25 jours avant d'avoir un effet, celui-ci est appliqué directement. Cette hypothèse a été modifiée par une sénescence progressive des plantes au cours des 25 jours. Le traitement post levée met aussi terme à la germination pendant 25 jours. Le traitement pré-levée met terme à la germination pendant 140 jours. Les traitements et les tontes peuvent être activés soit à des dates précises soit lorsque le LAI atteint une valeur seuil. La valeur de LAI à laquelle la plantes sont ramenées est fixée au préalable en paramètre d'entrée.

5.2.6 Modifications pour les fossés

Le module pour les fossés inclus des équations supplémentaires par rapport aux module de transfert de masse qui sont plus spécifiques aux transferts dans les fossés. La logique des deux compartiments de sol est cependant gardée afin de séparer le fond du fossé des bords. Ces équations ont été utilisées dans le modèle de M. Giraud afin de simuler les transferts de masse et le transport des graines dans ce type de réseau hydrographique pour le LISAH. Ce modèle ne simule par contre pas l'infiltration et le changement des stocks d'eau dans le sol par transfert de masse vertical. Afin de simuler cela, il est nécessaire d'ajouter les

dynamiques d'infiltration du modèle WaLIS au modèle de M. Giraud. Ce module n'a pas encore été complété dans le modèle.

5.3 Conclusion sur le modèle

Bien que tous les modules du modèle de croissance végétale et de transferts de masse ne soient pas encore complétés, il est possible de commenter le fonctionnement actuel du modèle. Les modules de gestion de la dormance et de vérification de la validité du temps hydrothermal fonctionnent de manière satisfaisante et répondent de façon vraisemblable aux variations de conditions climatiques pour la dormance et des paramètres d'entrée pour la vérification du temps hydrothermal. Les modules de germination et d'entretien du sol n'ont été que partiellement testés et de plus amples variations de paramètres d'entrée et des conditions climatiques sont nécessaires pour assurer leur fonctionnement sous toutes les conditions possibles. Ils semblent cependant répondre de manières satisfaisantes aux variations déjà testées. Le module de croissance végétal par calcul de poids sec est en cours de modifications, ses sorties du module semblaient erronées. En effet, le poids sec et le LAI augmentaient trop rapidement et dépassaient de loin des valeurs réalistes pour les plantes. Les modifications apportées ne fonctionnent pas toutes pour l'instant. L'absence du module de transfert de masse nous empêche aujourd'hui de conclure sur les bienfaits ou non d'un couvert enherbé sur l'augmentation du stock d'eau pour les vignes en milieux viticoles méditerranéens.

6. Prochaines étapes

Les prochaines étapes pour répondre à la problématique du stage sont la programmation des trois modules restants, les étapes d'évaluation des résultats et de la validité des modules et l'écriture du rapport et du manuel d'utilisation du programme. Afin de compléter l'étape programmation il est nécessaire d'incorporer les fonctions du modèle WaLIS décomposés en plusieurs boucle "for" et de les adapter au fonctionnement du modèle. Inclure les dynamiques du modèle de WaLIS sur les transferts de masse dans le modèle permettra de les adapter ensuite pour les inclure dans l'adaptation du modèle de M. Giraud pour les fossés. Compléter les modules liés à WaLIS est donc un prérequis pour intégrer la section fossés au modèle. Plusieurs hypothèses devront sans doute être ajoutées au modèle de M. Giraud pour le fonctionnement avec le modèle de WaLIS, une nouvelle étude bibliographique sera donc aussi probablement nécessaire.

Pour la calibration des paramètres des modèles, la base de données TRY pourra être utilisée afin d'obtenir les données nécessaires sur les plantes pour les modules de croissance végétale. Enfin, le modèle pourra être calibré grâce aux données accumulées sur le site de Roujan par le LISAH qui devraient être suffisantes pour une première phase de calibration. Bien que la durée de stage ne soit pas suffisante pour compléter une étape de validation du modèle en plus de la calibration, des pistes pour la méthode d'évaluation peuvent être tirées des évaluations des modèles précédents. Lorsque des bases de données sont disponibles, ces modèles utilisent régulièrement l'écart quadratique moyen, l'écart quadratique moyen relatif et le biais d'erreur pour évaluer les sorties du modèle (Duru et al, 2009; Celette et al, 2010). Les paramètres du modèle WaLIS ont aussi été évalués avec un test de sensibilité dans lequel des changements de plus et moins 30% par pas de 10 points de pourcentage ont été appliqués à chaque paramètre. Cette méthode peut aussi être appliquée aux paramètres choisis pour notre modèle (Celette et al, 2010).

7. Conclusion

A travers ce mémoire de stage nous avons exploré l'importance de la préservation de la viticulture en France qui est une partie indéniable du patrimoine et de l'économie du pays. Cette dernière fait cependant face à de nouveaux enjeux législatifs, climatiques et environnementaux qui menacent sa pérennité. Le développement de réponses à ces problématiques doit se faire dans le respect des contraintes actuelles et futures notamment au point concernant la gestion des ressources, la préservation des milieux, le respect des nouvelles attentes publiques et étatiques et le respect du patrimoine et des savoirs-faires ancestraux. L'importation des services écosystémiques que prodiguent naturellement des milieux naturels sains dans des milieux anthropisés tels que les surfaces agricoles offre des pistes de réponse à ces enjeux et contraintes. Nous avons donc vu que l'étude de l'impact du maintien d'un couvert enherbé en inter-rang et dans les fossés de recueil des eaux sur les transferts de masse verticaux et horizontaux s'inscrit dans cette logique.

Nous avons aussi pu justifier de l'utilisation de la modélisation dans ce domaine qui appuie la prise de décision et permet l'expérimentation à moindre coût. Parmi les modèles de croissance végétale et de transfert de masse que nous avons explorés, nous avons pu observer qu'un compromis était nécessaire entre facilité d'utilisation et réalisme. Le réalisme ne permettant pas toujours l'obtention de meilleurs résultats le modèle construit pour ce stage promeut une prise en main facilitée et une plus grande gamme de choix de modélisation pour les utilisateurs. Ce modèle doit cependant encore être complété par plusieurs modules cruciaux dont celui de transfert de masse, notamment pour inclure les fossés agricoles. De plus la calibration du modèle n'a pas encore été menée à bien.

Une fois ce modèle complété selon les étapes décrites, plusieurs possibilités de développement pourront être explorées. Le modèle pourrait par exemple inclure dans un second temps quelques dynamiques de germination présentées dans FlorSys dans un module optionnel que des utilisateurs bien fournis en données pourraient par exemple utiliser. De plus, l'étude d'un plus grand nombre de modèles de transfert de masse dans les fossés pourraient aussi permettre de développer une plus grande variété de modules pour les

utilisateurs. Il serait aussi intéressant de traduire ce modèle dans d'autre langage de programmation, tel que Python, pour lequel de nombreux modèles sont aussi construits. Il pourrait ainsi être utilisé conjointement avec d'autres modèle de croissance végétale ou de transfert de masse utilisant des équations différentes.

Bibliographie

AOC et Paysages. 2006. *INAO*. Disponible sur :

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewi4x8Tq25XqAhVIzYUKHVj2BdlQFjAAegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.inao.gov.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F231%2F1775%2Fversion%2F2%2Ffile%2FAOC_et_payages_part_1.pdf&usg=AOvVaw0HkqdVILIr25vpAjGE2xGc (Consulté le 17 juin 2020)

AOP-AOC, IGP, AB... : les labels de qualité dans l'alimentation. 2019. Disponible sur :

<https://www.economie.gouv.fr/particuliers/aop-aoc-igp-stg-labels-certification-alimentation> (Consulté le 17 juin 2020).

Benjamin L.R. et Park S.E. 2007. The Conductance model of plant growth and competition in monoculture and species mixtures: a review. *Weed Res*, 47(4), p. 284-298. DOI :

[10.1111/j.1365-3180.2007.00569.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00569.x)

Bradford K.J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50(2), p. 248-260. DOI :

[10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0248:AOHTTQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2)

Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.-H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., et Justes E. 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22(1), p. 69-92. DOI :

[10.1051/agro:2001005](https://doi.org/10.1051/agro:2001005)

Celette F., Ripoche A., et Gary C. 2010. WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 97(11), p. 1749-1759. DOI :

[10.1016/j.agwat.2010.06.008](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008)

Chiffres clés. [s d]. Dans : *CNIV* [En ligne]. Disponible sur :

<https://www.intervin.fr/etudes-et-economie-de-la-filiere/chiffres-cles> (Consulté le 15 juin 2020c).

Climat méditerranéen. [s d]. *Géoconfluences*. Disponible sur :

<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/climat-mediterraneen> (Consulté le 15 juin 2020).

Colnenne-David C., Angevin F., Chenu C., Craheix D., Girardin C., Leonard J., Oustrain S., Pelzer E., Trévisiol A., et Torres N. 2016. *Optimiser mes pratiques agricoles*. Dans :

ADEME [En ligne]. Disponible sur :

<https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/performance-energetique-energies-renouvelables/lenergie-exploitations-agricoles/optimiser-pratiques-agricoles> (Consulté le 16 juin 2020).

Contrat d'objectifs et de performance Etat-ADEME. 2016. Disponible sur :

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_cop_8757.pdf (Consulté le 16 juin 2020).

Crabit A. 2020. Master Sciences de l'Eau: Hydrologie des Bassins Versants Cultivé. Présenté à: Université de Montpellier, faculté des Sciences.

Dénominations de vins existantes – fiche technique. 2011. Ministère de l'agriculture, de

l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire. Disponible sur :

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiK1vyeuYjqAhWjzIUkHV8MCi4QFjACegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.inao.gouv.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F231%2F1775%2Fversion%2F2%2Ffile%2FAOC_et_paysages_part_1.pdf&usg=AOvVaw0HkqdVILIr25vpAjGE2xGc (Consulté le 17 juin 2020)

Parlement européen 2006. *Directive 2006/118/CE du parlement européen et du conseil.*

Disponible sur :

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:02006L0118-20140711>

(Consulté le 16 juin 2020).

Duru M., Adam M., Cruz P., Martin G., Ansquer P., Ducourtieux C., Jouany C., Theau J.P., et Viegas J. 2009. Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. *Ecological Modelling*, 220(2), p. 209-225. DOI :

[10.1016/j.ecolmodel.2008.09.015](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.015)

Duru M., Cruz P., Martin G., Desange M., Jouany C., et Zerourou A. 2010. Herb'sim : un modèle pour raisonner la production et l'utilisation de l'herbe. , p. 11.

Fabre, J. C., Louchart, X., Moussa, R., Dagès, C., Colin, F., Rabotin, M., Raclot, D., Lagacherie, P., & Voltz, M. 2010. OpenFLUID : a software environment for modelling fluxes in landscapes. , p. 13.

Fried G., Cordeau S., Metay A., et Kazakou E. 2019. Relative importance of environmental factors and farming practices in shaping weed communities structure and composition in

- French vineyards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 275, p. 1-13. DOI : [10.1016/j.agee.2019.01.006](https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.006)
- Garcia L. 2013. Evaluation des conséquences hydrique et azotée de différents modes de gestion de parcelles viticoles sur la croissance de la vigne : Approche par l'expérimentation virtuelle. , p. 98.
- Garcia L. 2018. *Caractérisation fonctionnelle de cultures de services en vignoble et étude des relations entre marqueurs fonctionnels des communautés végétales et services écosystémiques pour la viticulture.*
- Gardarin A., Dürr C., et Colbach N. 2012. Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecological Modelling*, 240, p. 123-138. DOI : [10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004)
- Giraud M., Vinatier F., et Bailly J. 2020. Importance of the spatial and temporal organisation of ditch maintenance practices over the hydrochorous dispersal of weed seeds: an exploratory research.
- Connaître le climat méditerranéen et les enjeux du changement climatique. 2017. Dans : *GREC-SUD* [En ligne]. Disponible sur : <http://www.grec-sud.fr/article-cahier/articles-du-cahier-climat/connaitre-le-climat-mediterraneen-et-les-enjeux-du-changement-climatique/> (Consulté le 15 juin 2020).
- Hannah L., Roehrdanz P.R., Ikegami M., Shepard A.V., Shaw M.R., Tabor G., Zhi L., Marquet P.A., et Hijmans R.J. 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), p. 6907-6912. DOI : [10.1073/pnas.1210127110](https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110)
- Héry M. 2019 Master Sciences de l'Eau: Contaminants du milieu aquatique et développement durable.
- Humbert. [s d]. *Le vignoble Français est-il menacé par le changement climatique ?* Dans : *La Revue du vin de France* [En ligne]. Disponible sur : https://www.larvf.com/vin-vignoble-francais-changement-climatique-rechauffement-yves-leers-entretien-interview_4476986.asp (Consulté le 15 juin 2020).
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailles J., Hilal M., et Wavresky P. 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography*, Disponible sur : <http://journals.openedition.org/cybergeo/23155> (Consulté le 15 juin 2020).

Kattge J., Díaz S., Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P., Bönisch G., Garnier E., Westoby M., Reich P.B., Wright I.J., Cornelissen J.H.C., Violle C., Harrison S.P., Bodegom P.M.V., Reichstein M., Enquist B.J., Soudzilovskaia N.A., Ackerly D.D., Anand M., Atkin O., Bahn M., Baker T.R., Baldocchi D., Bekker R., Blanco C.C., Blonder B., Bond W.J., Bradstock R., Bunker D.E., Casanoves F., Cavender-Bares J., Chambers J.Q., Iii F.S.C., Chave J., Coomes D., Cornwell W.K., Craine J.M., Dobrin B.H., Duarte L., Durka W., Elser J., Esser G., Estiarte M., Fagan W.F., Fang J., Fernández-Méndez F., Fidelis A., Finegan B., Flores O., Ford H., Frank D., Freschet G.T., Fyllas N.M., Gallagher R.V., Green W.A., Gutierrez A.G., Hickler T., Higgins S.I., Hodgson J.G., Jalili A., Jansen S., Joly C.A., Kerckhoff A.J., Kirkup D., Kitajima K., Kleyer M., Klotz S., Knops J.M.H., Kramer K., Kühn I., Kurokawa H., Laughlin D., Lee T.D., Leishman M., Lens F., Lenz T., Lewis S.L., Lloyd J., Llusià J., Louault F., Ma S., Mahecha M.D., Manning P., Massad T., Medlyn B.E., Messier J., Moles A.T., Müller S.C., Nadrowski K., Naeem S., Niinemets Ü., Nöllert S., Nüske A., Ogaya R., Oleksyn J., Onipchenko V.G., Onoda Y., Ordoñez J., Overbeck G., Ozinga W.A., Patiño S., Paula S., Pausas J.G., Peñuelas J., Phillips O.L., Pillar V., Poorter H., Poorter L., Poschlod P., Prinzing A., Proulx R., Rammig A., Reinsch S., Reu B., Sack L., Salgado-Negret B., Sardans J., Shiodera S., Shipley B., Siefert A., Sosinski E., Soussana J.-F., Swaine E., Swenson N., Thompson K., Thornton P., Waldram M., Weiher E., White M., White S., Wright S.J., Yguel B., Zaehle S., Zanne A.E., et Wirth C. 2011. TRY – a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 17(9), p. 2905-2935. DOI : [10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x)

L'agriculture française en quelques chiffres. 2019. Disponible sur :

<https://ue.delegfrance.org/l-agriculture-francaise-en-3038> (Consulté le 12 juin 2020).

Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., et Valantin-Morison M. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29(1), p. 43-62. DOI : [10.1051/agro:2007057](https://doi.org/10.1051/agro:2007057)

Mayer N. [s d]. *Climat méditerranéen*. Dans : *Futura* [En ligne]. Disponible sur :

<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-climat-mediterraneen-16806/> (Consulté le 22 juin 2020).

Moussa R., Voltz M., et Andrieux P. 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrol. Process.*, 16(2), p. 393-412. DOI : [10.1002/hyp.333](https://doi.org/10.1002/hyp.333)

Pare N. 2011. Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien.

Scaife A., Cox E.F., et Morris G.E.L. 1987. The Relationship Between Shoot Weight, Plant Density and Time During the Propagation of Four Vegetable Species. *Annals of Botany*, 59(3), p. 325-334. DOI : [10.1093/oxfordjournals.aob.a087321](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087321)

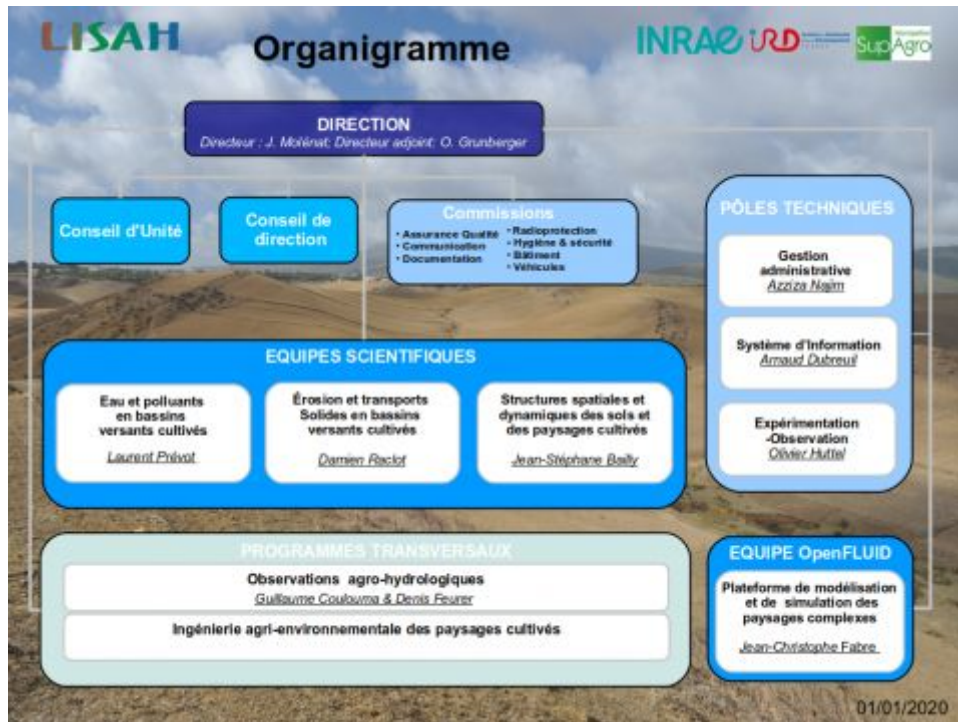
Prévot A. 2019. Master Sciences de l'Eau: Eau et Production Végétale. Présenté à: Université de Montpellier, faculté des Sciences.

Vinatier F., Lagacherie P., Voltz M., Petit S., Lavigne C., Brunet Y., et Lescourret F. 2016. An Unified Framework to Integrate Biotic, Abiotic Processes and Human Activities in Spatially Explicit Models of Agricultural Landscapes. *Front. Environ. Sci.*, 4. Disponible sur : <http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fenvs.2016.00006/abstract> (Consulté le 23 juin 2020).

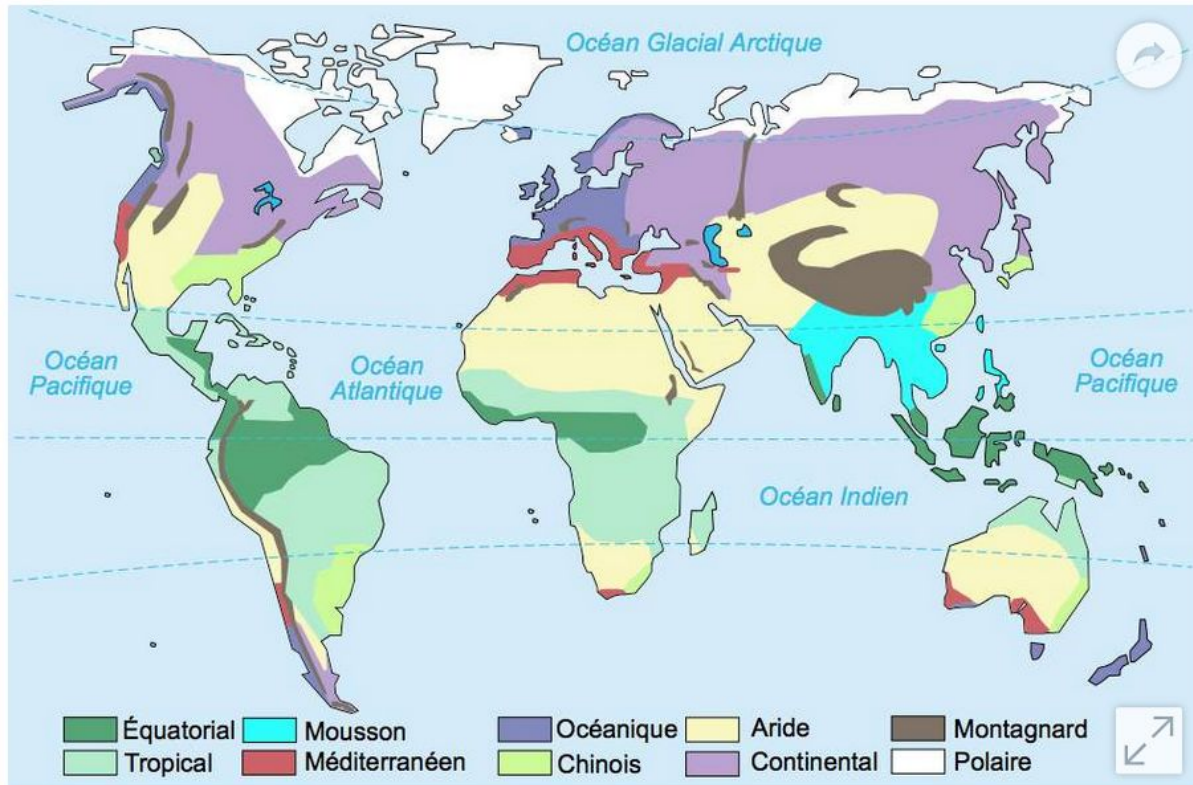
Annexes

Annexe 1: Organigramme du LISAH

(<https://www.umr-lisah.fr/?q=fr/content/organigramme>)



Annexe 2: Répartition des climats sur la planète (Mayer, s.d.)



Annexe 3: Schéma conceptuel illustrant les différents termes des bilans hydriques et azotés dans la parcelle viticole enherbée (Garcia, 2018)

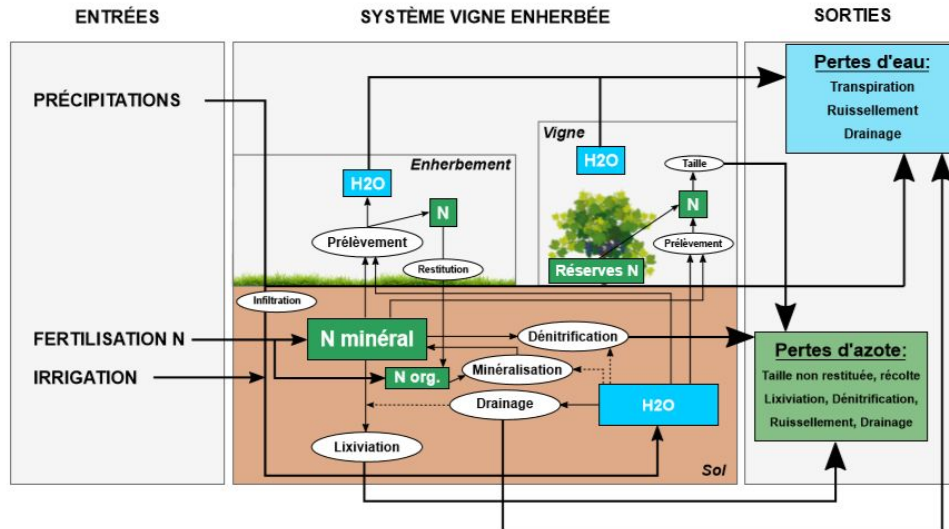


Figure 1.3 Schéma conceptuel illustrant les différents termes des bilans hydriques et azotés dans la parcelle viticole enherbée. Les flèches pleines indiquent les flux d'eau et d'azote, les flèches en pointillés indiquent l'influence de certains facteurs sur les flux. Les pertes d'eau et d'azote sont indiquées dans la partie de droite du schéma

Annexe 4: Paramètres du modèle FlorSys (Gardarin et al, 2012)

Species-dependent parameters in FlorSys entered by the user (except *) or estimated from raits listed in Table 2.

Model parameter	Explanation and unit
<i>Seed mortality</i>	
$a_{w a}$ ($a_{w \text{ young}}$, $a_{w \text{ old}}$)	Annual seed mortality rate (seeds-seeds ⁻¹ .year ⁻¹)
<i>Seed dormancy variations and germinability</i>	
TRO_w	Date of dormancy release onset (Julian days)
TRE_w	Date of dormancy release end (Julian days)
TIO_w	Date of dormancy induction onset (Julian days)
TIE_w	Date of dormancy induction end (Julian days)
$ndmax_{w a}$ ($ndmax_{w \text{ young}}$, $ndmax_{w \text{ old}}$)	Maximum rate of non-dormant seeds (seeds-seeds ⁻¹)
$ndmin_{w a}$ ($ndmin_{w \text{ young}}$, $ndmin_{w \text{ old}}$)	Minimum rate of non-dormant seeds (seeds-seeds ⁻¹)
$rp_{w a}$ ($rp_{w \text{ young}}$, $rp_{w \text{ old}}$)	Relative variation in the rate of non-dormant seeds in case of the absence of light stimulation (seeds-seeds ⁻¹)
rd_w	Relative reduction in the rate of non-dormant seeds with increasing seed depth (seeds-seeds ⁻¹ .cm ⁻¹)
ro_w	Relative reduction in the rate of non-dormant seeds for seeds located on soil surface
<i>Seed germination</i>	
θ_{base_w}	Base temperature for germination (°C)
ψ_{base_w}	Base water potential for germination (MPa)
$xg0_{w pd}^*$	Time (°C-days) from germination triggering to first germination
$xg50_{w pd}^*$	Time (°C-days) from germination triggering to 50% germinated non-dormant seeds
$vg50_{w pd}^*$	Rate of germinated seeds per unit time at $xg50_{w pd}$, in seeds-seeds ⁻¹ .°C ⁻¹ .days ⁻¹
$bg_{w pd}^*$	Shape parameter (adimensional) for germination progress
<i>Seedling pre-emergent growth and mortality</i>	
$Lmax_w$	Maximum length (mm) of shoot during pre-emergent growth
$Rmax_w$	Maximum length (mm) of root during pre-emergent growth
$x150_w$	Time (°C-days) necessary for the shoot to reach half of $Lmax_w$
$xr50_w$	Time (°C-days) necessary for the root to reach half of $Rmax_w$
bl_w	Shape parameter (adimensional) for pre-emergent shoot growth
br_w	Shape parameter (adimensional) for pre-emergent root growth
β_w	Seedling mortality rate (seedlings-seedlings ⁻¹) on soil surface in intermediate soil structure
$\beta_{fine_earth_w}$	Additional seedling mortality (seedlings-seedlings ⁻¹) in case of fine-earth soil structure
$\beta_{compacted_w}$	Additional seedling mortality (seedlings-seedlings ⁻¹) in case of compacted soil structure
y_w	Increase in mortality with seed depth, in seedlings-seedlings ⁻¹ .ln(mm) ⁻¹

w, weed species; a, seed age class (young vs. old); p, photo-stimulation status (yes vs. no); d, current day; *, dynamic parameters that cannot be entered by the user as these vary over time.

Annexe 5: Equations de prédictions de traits et des paramètres du modèle FlorSys (Gardarin et al, 2012)

Synthesis of equations predicting species-dependent parameters from species traits or expert knowledge. Other columns indicate the number of species that were used for establishing these regressions as well as the p-value and R^2 of the statistical analysis. These species-dependent parameters are used in the model equations (see Appendix A) indicated in the last column.

Estimation of biological parameters from traits or expert knowledge	Number of species	p-value	R^2	Reference	Equations where these parameters are used
Seed mortality					
$a_{w\ young} = \exp[-4.63 - 0.80 \ln(\text{coat}_w)]$	18	$4.1 \cdot 10^{-2}$	0.24	Gardarin et al. (2010b)	5
$a_{w\ old} = \exp[-7.23 - 1.67 \ln(\text{coat}_w)]$	17	$2.0 \cdot 10^{-4}$	0.62	Gardarin et al. (2010b)	5
Seed dormancy					
Timing parameters					
$TIO_w = -174.3 + 16.0 \cdot \text{tee}_w$	25	$<10^{-4}$	0.69	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	8, 9
$TIE_w = -79.0 + 14.8 \cdot \text{tee}_w$	25	$<10^{-4}$	0.68	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	9, 10
$TRO_w = 160.2 + 15.7 \cdot \text{tee}_w$	25	$<10^{-4}$	0.79	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	6, 7, 10
$TRE_w = -138.6 + 15.8 \cdot \text{tee}_w$	25	$<10^{-4}$	0.75	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	7, 8
Rates of non-dormant seeds					
$\text{ndmin}_w\ \text{young} = [\sin(0.05 + 1.34 \cdot \text{shape}_w - 2.11 \cdot \text{coat}_w)]^2$	12	$4.3 \cdot 10^{-2}$	0.48	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	6, 7, 9, 10
$\text{ndmax}_w\ \text{young} = [\sin(0.89 + 1.81 \cdot \text{shape}_w - 0.06 \cdot \text{mass}_w)]^2$	28	$1.9 \cdot 10^{-3}$	0.38	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	7, 8, 9
$\text{ndmin}_w\ \text{old} = [\sin(0.08 + 2.23 \cdot \text{shape}_w - 3.78 \cdot \text{coat}_w)]^2$	12	$1.5 \cdot 10^{-2}$	0.58	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	6, 7, 9, 10
$\text{ndmax}_w\ \text{old} = [\sin(1.20 + 1.20 \cdot \text{shape}_w - 2.59 \cdot \text{coat}_w)]^2$	12	$1.8 \cdot 10^{-2}$	0.56	Gardarin and Colbach (submitted for publication)	7, 8, 9
Effect of depth on germinability					
$\text{rd}_w = \exp(-\text{Lmax}_w^{0.33})$	7	$3.1 \cdot 10^{-4}$	0.81	This paper	12
Seed germination					
Base temperature and base water potential					
$\theta_{\text{base}_w} = 1.10 \cdot \text{PbO}[\text{mass}_w, \text{pt}(\theta_w) - 1] - 2.03$	25	$<10^{-4}$	0.79	Gardarin et al. (2010c)	18, 22
$\psi_{\text{base}_w} = -2.18 \cdot (\theta_{\text{base}_w} + 2)^{-0.53}$	17	$<10^{-4}$	0.81	Gardarin et al. (2010c)	18, 19, 29
Germination dynamics					
<i>If the seed lipid content (lipid_w, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) is lower than 30%:</i>					
$\text{xg0}_{\text{wpd}} = \exp[3.56 - 0.18 \ln(\text{pND}_{\text{wapld}}) - 0.39 \ln(\theta_{\text{base}_w} + 2) - 0.23 \ln(\text{lipid}_w) - 0.30 \ln(\text{sam}_w)]$	23	$<10^{-4}$	0.41	Gardarin et al. (2011)	20
$\text{xg50}_{\text{wpd}} = \exp[4.45 - 0.25 \ln(\text{pND}_{\text{wapld}}) - 0.79 \ln(\theta_{\text{base}_w} + 2) - 0.29 \ln(\text{lipid}_w)]$	24	$<10^{-4}$	0.46	Gardarin et al. (2011)	20
$\text{vg50}_{\text{wpd}} = \exp[-4.77 + 1.07 \ln(\text{pND}_{\text{wapld}}) + 1.53 \ln(\theta_{\text{base}_w} + 2) + 0.50 \ln(\text{lipid}_w)]$	22	$<10^{-4}$	0.59	Gardarin et al. (2011)	20
<i>Else:</i>					
$\text{xg0}_{\text{wpd}} = \exp[3.56 - 0.18 \ln(\text{pND}_{\text{wapld}}) - 0.39 \ln(\theta_{\text{base}_w} + 2) - 1.19 \ln(\text{lipid}_w) - 0.30 \ln(\text{sam}_w)]$	23	$<10^{-4}$	0.41	Gardarin et al. (2011)	20
$\text{xg50}_{\text{wpd}} = \exp[4.45 - 0.25 \ln(\text{pND}_{\text{wapld}}) - 0.79 \ln(\theta_{\text{base}_w} + 2) - 0.86 \ln(\text{lipid}_w)]$	24	$<10^{-4}$	0.46	Gardarin et al. (2011)	20
$\text{vg50}_{\text{wpd}} = \exp[-4.77 + 1.07 \ln(\text{pND}_{\text{wapld}}) + 1.53 \ln(\theta_{\text{base}_w} + 2) + 0.56 \ln(\text{lipid}_w)]$	22	$<10^{-4}$	0.59	Gardarin et al. (2011)	20
Pre-emergent growth					
Pre-emergent shoot and root elongation					
$\text{Lmax}_w = 69.9 \cdot \text{mass}_w^{0.50}$	12	$<10^{-4}$	0.95	Gardarin et al. (2010a)	23, 26, 27
$\text{Rmax}_w = 14.3 \cdot \text{mass}_w^{0.29}$	11	$<10^{-4}$	0.89	Gardarin et al. (2010a)	24, 29
$\text{x150}_w = 44.59 + 0.40 \cdot \text{Lmax}_w$	12	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.55	Gardarin et al. (2010a)	27
$\text{xt150}_w = 21.93 \cdot \text{mass}_w^{0.33}$	11	$5.4 \cdot 10^{-3}$	0.64	Gardarin et al. (2010a)	24
Seedling sensitivity to clods					
$\text{aBuried}_w = \exp(-1.83 - 2.38 \cdot \text{diam}_w)$	10	$<10^{-4}$	0.93	Gardarin et al. (2010a)	Intermediate parameters used below
$\text{C0surface}_w = 7.80 + 22.56 \cdot \text{diam}_w$	10	$<10^{-4}$	0.83	Gardarin et al. (2010a)	Idem
$\text{C0buried}_w = -8.3 + 29.0 \cdot \text{diam}_w$ (if $\text{taxa}_w = \text{monocotyledon}$)	10	$2.3 \cdot 10^{-3}$	0.87	Gardarin et al. (2010a)	Idem
$\text{C0buried}_w = 3.3 + 29.0 \cdot \text{diam}_w$ (else)	10	$2.3 \cdot 10^{-3}$	0.87	Gardarin et al. (2010a)	Idem
Pre-emergent mortality					
$\beta_w = -3.523 - 0.018 \cdot \text{C0buried}_w + 13.418 \cdot \text{aBuried}_w$	10	$<10^{-4}$	0.98	This paper	30
$\beta_{\text{fine.earth}_w} = -0.050 - 0.027 \cdot \text{C0buried}_w$	10	$<10^{-4}$	0.96	This paper	30
$\beta_{\text{compact}_w} = 0.328 + 0.013 \cdot \text{C0buried}_w$	10	$1.3 \cdot 10^{-2}$	0.61	This paper	30
$\gamma_w = 0.636 - 0.010 \cdot \text{C0buried}_w + 0.002 \cdot \text{C0surface}_w$	10	$<10^{-4}$	0.98	This paper	30

Annexe 6: Modèles conceptuels du modèle FlorSys (Gardarin et al, 2012)

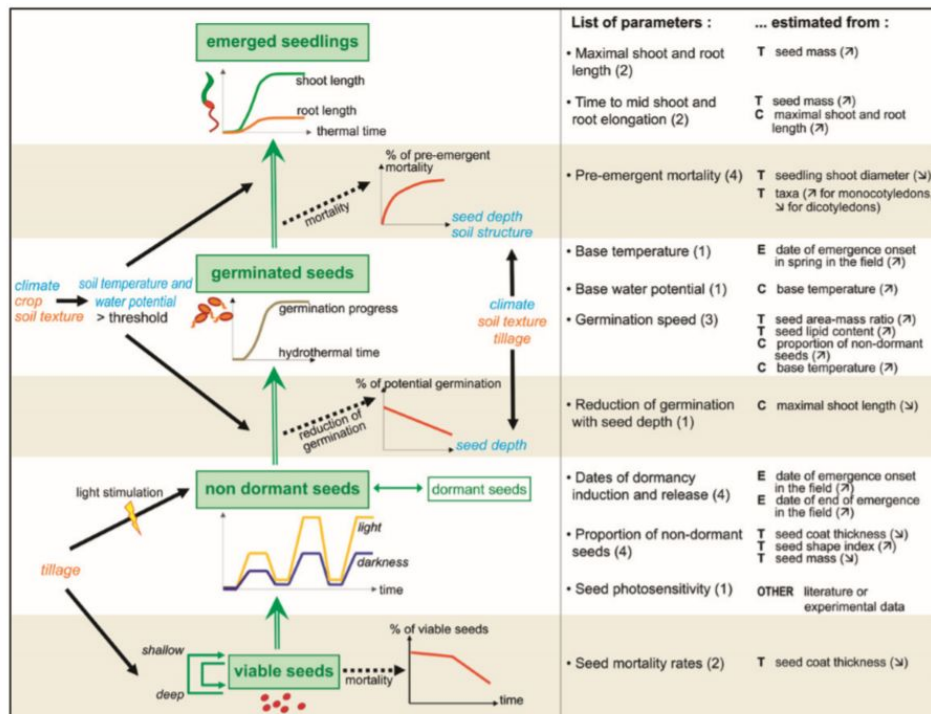
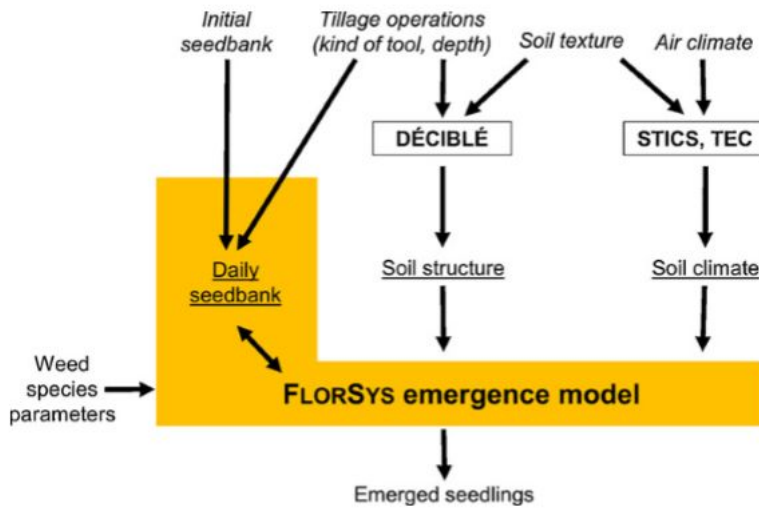


Fig. 2. Synthetic model representation of the structure of the emergence model FlorSys. The main state variables (in boxes) are linked by double arrows. Dotted arrows represent mortality or reduction of germination events. The effects of cropping system components and pedo-climatic variables (in italics) on processes are represented by full simple arrows. On the right side are listed the main parameters (and between brackets the number of parameters for each of these processes). For unstudied species, parameter values can be estimated using generic relationships from seed seedling traits (T), expert knowledge (E) or from correlations with other parameters (C). Arrows (↗ and ↘) indicate the sign of the correlation (positive or negative) between the parameter and T, E or C.

Annexe 7: modèle conceptuel de WaLIS (Celette et al, 2010)

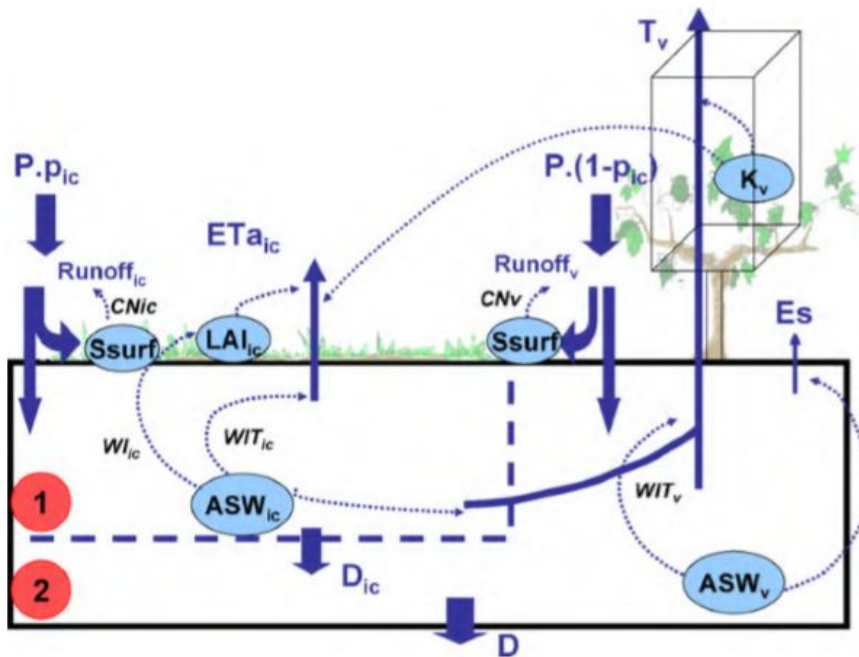


Fig. 1. Conceptual representation of the intercropped system water balance. ASW_{ic} and ASW_v are the available soil water of the intercrop and grapevine compartments, respectively. Each soil compartment has been numbered in a red circle. Compartment '1' is the intercrop's one and '2' the grapevine's one. D_{ic} is the drainage flow from the intercrop compartment to the one below and D is the water loss by drainage to deep soil layers inaccessible to grapevine. LAI_{ic} is the leaf area index of the intercrop. Es is the soil evaporation from the bare soil of the row. Ssurf represents the soil surface state and could differ between row and inter-row. This soil surface state determines the CN parameter of inter-row (CN_{ic}) and row (CN_v) that affects surface runoff (Runoff_{ic} and Runoff_v, respectively). ETa_{ic} is the actual evapotranspiration of the intercrop cover (both cover transpiration and soil evaporation). T_v is the grapevine transpiration which is driven by the grapevine light interception coefficient (k_v). Finally, P is the precipitation and p_{ic} is the soil proportion covered by the intercrop.

Annexe 8: Modèle conceptuel du modèle de M. Giraud (Giraud et al, 2020)

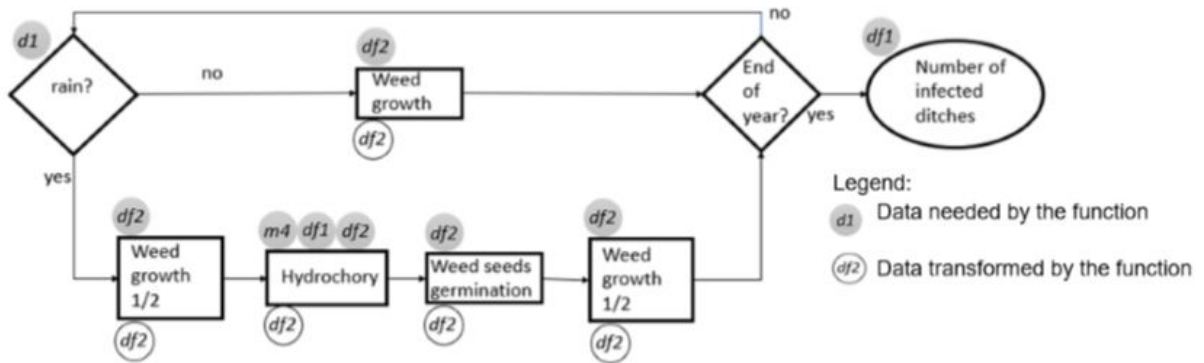


Fig. 1. Representation of the simulation design

Annexe 9: Script du modèle de croissance végétal développé pour le LISAH

```
-----  
-----  
-----  
# | |  
-----  
# |          SCRIPTS REALIZED BY ALEC SICARD  
  | -----  
#  
-----  
-----  
-----  
  
rm(list=ls())  
  
#  
-----  
-----  
-----  
# | |  
-----  
-----  
-----  
# | |  
-----  
# |          DATA AND PARAMETERS LOADING  
  | -----  
#  
-----  
-----  
-----  
  
# ~~~~~  
~  
# Temporal series | -----  
# ~~~~~
```

```

datClimate <- read.csv("IN/mockclimatedata.csv", header = T) #should include rows = days, columns
= climate data eg. avg. temp in C, PAR, precipitation etc
datClimate$day <- as.POSIXlt(datClimate$day)
datGround <- read.csv("IN/mockgrounddata.csv", header = T,dec=",") #should include columns =
ground dynamics information eg. infiltration rate, CN, dimensions, soil temp
datCover <- read.csv("IN/mockplantcoverdata.csv", header = T)

#~~~~~
~
# Parameters | -----
#~~~~~
~
#set by hand
juneDate <-datClimate[275,"day"] #used to reinduce dormancy, should be June 2nd
juneDayCounter <- 275 #the row number in the csv file where days and temperatures are recorded,
used in the calculations to reactivate dormancy
springDate <- datClimate[123,"day"] #date end of germination for fall plants, 1st feb, on normal year
it's the 32nd day + number of days since september 1st (beginning date of simulation)

#ground parameters
soilWater <- matrix(nrow = nrow(datClimate), ncol = 8, dimnames =
list(c(1:nrow(datClimate)),c("day", "ASW1", "ASW1hg", "ASW2", "ASW2hg", "FTTW",
"FTTWhg", "B"))) #matrix containing the evolution of water in soil, columns in this order: day,
ASW1, ASW1hg, ASW2, ASW2hg, FTTW, FTTWhg, B --> to be filled
soilWater=as.data.frame(soilWater) # FABRICE: preferring the data.frame format for column
accessing
pauseGerminationCountDown <- 0 #count down the number of days untill germination restarts
pauseGerminationCountDown <- 145 # number of days during which no germination occurs after the
application of a pre emergence herbicide
senescenceCountDown <-0 #count down the number of days until the post treatment herbicide
reduces TLAI to LAIres
reductionLAI <- 0.2 #the percentage reduction of LAI for each day of senescence countdown
countDownDuration <- 26 #the countDownDuration defines the number of days (+1 day for
programming purposes) before senescence induced by post emergence herbicide is complete, in this
version, it takes 25 days for senescence to be complete + 1 = 26 days

#dormancy parameters
dormancy <- "ON" #parameter to end dormancy, ON = seeds are dormant, OFF = seeds are
non-dormant
dormancyEndDate <- 0 #keep track of date dormancy ended
tempDormancy <- 50 #tempOnDormancy defines the sum of temperature of 2 days that must be
reached to turn on dormancy for SPRING plants
dormancyOnDate <- 0 #keep track of when dormancy should be re-induced

#Hydrothermal time verification parameters
sumHTTg50ratio <- 0 #will be used to compute avgHTT50ratio

```

```

#germination parameters
germCohorts <- matrix(nrow=nrow(datCover),ncol=1) # save the cohorts of germinated seeds for
subsequent operations, will have to delete first column later
sumAcceptedRatio <- 0 #used for HT/tg50 ratio testing
sumASWhg <-0 #sum of soilwater above the threshold for plant germination the units are in MPa
instead of the mm used in sumASW
sumTemphg <- 0 #same as above for ground temperature
gt <- 0 # used to compute newly germinated seeds
germinationCounter <- 0 #used to keep track of the number of cohorts
pirFull <- "NO" #parameter to check whether there is still space left for plant cover growth, if turned
to yes there is no more germination until space is freed up in the interrack either through some
maintenance or natural leaf senescence
positiveGermination <- "NO" # used to check if any germination happened a certain day
rainGermination <- 36 #rainGermination defines the amount of rain, in mm, over 2 days necessary to
turn OFF dormancy and activate germination

```

```

#cover growth parameters

```

```

setA = 0.035 #standard value for A, the allometric constant, if no value for A has been included in the
input file for a specific species

```

```

for(param in 1:nrow(datCover)){ #param == parameters
  if(is.na(datCover[param, "A"]) == T){
    datCover[param,"A"] <- setA
  }
}

```

```

setk = 0.62 #standard value for k, the light interception coefficient, if no value for k has been included
in the input file for a specific species

```

```

for(param in 1:nrow(datCover)){ #param == parameters
  if(is.na(datCover[param, "K"]) == T){
    datCover[param,"K"] <- setk
  }
}

```

```

setRGR = 0.219 #standard value for RGR, the relative growth rates for plants in the inter rank, if no
value for RGR has been included in the input file for a specific species

```

```

for(param in 1:nrow(datCover)){ #param == parameters
  if(is.na(datCover[param, "RGR"]) == T){
    datCover[param,"RGR"] <- setRGR
  }
}

```

```

setq = 0.1 #standard value for q, the ponderation coefficient for the impact of light versus temperature
for plants in the inter rank, if no value for q has been included in the input file for a specific species

```

```

for(param in 1:nrow(datCover)){ #param == parameters

```

```

if(is.na(datCover[param, "q"]) == T){
  datCover[param,"q"] <- setq
}
}

growthCohorts <- matrix(nrow=nrow(datCover),ncol=1) # use the cohorts of germinated seeds for to
compute their growth post germination, will have to delete first column later

#~~~~~
~
#deleting NA values
growthCohorts[is.na(growthCohorts[,1]),1]=0

#~~~~~
~

lnGrowthCohorts <- matrix(nrow=nrow(datCover),ncol=1) #cohorts' growth is first computed as a
natural logarithm
lnGrowthCohorts[is.na(lnGrowthCohorts[,1]),1]=0 #deleting NA values
EDD <- matrix(nrow=nrow(datCover),ncol=1)
TLAI <- 0 #variable representing the extent of inter rank space covered by plants
STLAI <- NULL #vector of saved TLAIs to be used for graph creation
sumASW <- 0 #variable used to compute hydro time since end of dormancy for germination
sumTemp <- 0 #variable used to compute thermal time since end of dormancy for germination
growthMethod <- 0 #will be used to check whether the LAI growth method for plant cover growth can
be used
LAires <- datGround[1, "LAires"] #LAires is the residual LAI after treatment such as mowing or
herbicide application

#inter-rank plant treatment parameters: these parameters will determine which type of ground
maintenance is applied and at which date (either fixed or when LAI reaches a certain value, their
values are changed through the CSV input files)
activationMowingHeight <- "OFF"
activationMowingDate <- "OFF"
activationPreEmergenceHeight <- "OFF"
activationPreEmergenceDate <- "OFF"
activationPostEmergenceHeight <- "OFF"
activationPostEmergenceDate <- "OFF"
inProcess <- "NO" #determines whether a treatment is already being applied, otherwise the senescence
countdown will never reach 0

#day circulation parameters
dayCounter <- 0 #used in all day-specific computations

#fake ground water data for model testing
datWater<- read.csv("IN/mocksoilwaterdata.csv")

```



```
# ~~~~~  
~  
soilWater$ASW1hg <- datWater$ASWhg
```

```
datResults <- data.frame(day=datClimate$day,dayCounter=1:length(datClimate$day),  
propGerm=NA,totalDryWeight=NA, STLAI = NA, TRNDS = NA)  
matnames <- c("propGerm", "germNumbers", "dryWeight", "LAI")  
arrayResults <- array(data = 0, dim = c(nrow(datCover),nrow(datClimate), 4), dimnames =  
list(row.names(datCover),1:nrow(datClimate),matnames))
```

```
# ~~~~~  
~  
#
```

```
-----  
-----  
-----  
# | |  
-----  
# | SCHEDULER |  
-----  
#  
-----  
-----  
-----
```

```
#all-encompassing for loop running the model for each day of the studied year  
for (d in 1:nrow(datClimate)){  
  
today <- datClimate[d,"day"]  
dayCounter <- d # will be used if some computations should only be done on specific dates  
print(paste("day",dayCounter))
```

```
# ~~~~~  
~  
# Module #COVER1 : #Precipitation separation between the two ground compartments: pir and pr  
computation (% soil surface) | -----  
# ~~~~~  
~
```

```

if(dayCounter == 1){
  pirpercent <- datGround[1,"pir"]/(datGround[1,"pr"]+datGround[1,"pir"])
  prpercent <- datGround[1,"pr"]/(datGround[1,"pr"]+datGround[1,"pir"])
  p1d <- NULL
  p2d <- NULL
  for (date in 1:nrow(datClimate)){
    p1d <- c(p1d, datClimate[date,"precipitation"]*pirpercent) #precipitation is separated between
    pir and pr based on the % of the total area these surfaces represent
    p2d <- c(p2d, datClimate[date,"precipitation"]*prpercent)
  }
  #adding the two vectors as columns to datClimate
  datClimate <- cbind(datClimate, p1d)
  datClimate <- cbind(datClimate, p2d)
}

```

```

#~~~~~
~
# Module #DORM1 : TO DEFINE          |-----

```

```

#~~~~~
~

```

```

if(today < juneDate){
  while(dormancy == "ON"){
    for(date in 2:nrow(datClimate)){ #we compute rain on two days to begin germination
      p2days <- datClimate[date,"precipitation"]+datClimate[date-1,"precipitation"]
      if(p2days>=rainGermination){
        dormancy <- "OFF"
        dormancyEndDate <- datClimate[date,"day"] #saving the day dormancy ends, used to
        compute germination
        for(date in 1:nrow(datCover)){
          datCover[date,"NDS"]<-datCover[date,"numberofplants"] #the Non-Dormant Seed cell of
          each species takes on the value of the number of viable seeds = average number of observed grown
          plants of that species
          datCover[date,"RNDS"] <- datCover[date,"NDS"] #RNDS: Remaining Non-Dormant Seeds
          are used in computing germination
        }
      }
    }
  }
}
}

```

```

#~~~~~
~

```

```
# Module #DORM2 : dormancy reinduction |
```

```
-----  
# ~~~~~  
~  
if(dormancy == "OFF" & today >= juneDate){  
  for(date in juneDayCounter:nrow(datClimate)){  
    temp2days <- (datClimate [date,"T"] + datClimate [date-1, "T"])  
    if (temp2days >= tempDormancy){  
      dormancyOnDate <- datClimate[date,"day"]  
    }  
  }  
  if(dormancyOnDate != 0) { #dormancy is reactivated once two consecutive days are above  
25 degrees avg after June 1st  
    if(dormancyOnDate == today){  
      dormancy <- "ON"  
    }  
  }  
}
```

```
-----  
# ~~~~~  
~  
# Module #HT1 : Hydro-Thermal time verification module HT |  
-----
```

```
# ~~~~~  
~
```

```
if(dayCounter == 1){ #to speed up the model, this verification ensures HT verification is done only  
once  
  testHT <- matrix(nrow=nrow(datCover)) #used later to identify correct and incorrect values
```

```
-----  
# ~~~~~  
~
```

```
for( sp in 1:nrow(datCover)){ # sp == species  
  sumHTTg50ratio <- sumHTTg50ratio + datCover[sp,"HT"]/datCover[sp,"Tg50"]  
}
```

```
-----  
# ~~~~~  
~
```

```
avgHTTg50ratio <- sumHTTg50ratio/nrow(datCover) #average hydrothermal time to  
minimum temp for germination  
counter <- 0 #used after the next for loop to compute an average  
for ( sp in 1:nrow(datCover)){ # sp == species
```

```

    if((datCover[sp,"HT"]/datCover[sp,"Tg50"])/avgHTTg50ratio <= 0.75 &
(datCover[sp,"HT"]/datCover[sp,"Tg50"])/avgHTTg50ratio >= 0.25 ){ #the 25% and 75% bounds are
chosen arbitrarily, to be replace with literature values
    counter <- counter + 1
    sumAcceptedRatio <- sumAcceptedRatio + datCover[sp,"HT"]
    testHT[sp,1] <- datCover[sp,"HT"]
  }else{
    testHT[sp,1] <- 0 #assuming HT/Tming !=0, placing a 0 value in this matrix to identify the
HT/Tming outliers will enable us to easily replace this value with a new one
  }
}
avgAcceptedRatio <- sumAcceptedRatio/counter #computing a HT/Tg50 average without the
outliers
for(sp in 1:nrow(datCover)) { # sp == species
  if(testHT[sp,1] == 0 ){
    testHT[sp,1] <- avgAcceptedRatio #the identified incorrect HT values are replaced with the
average HT value of all plants not considering the outliers
  }
  datCover[sp,"HT"] <- testHT [sp,1] #all HT/Tming that were outliers are replaced with the
average of HT/Tming values without these outliers
}
}

```

```

#~~~~~
~
# Module #HT2 : Germination module          | -----
#~~~~~
~

```

```

if(dormancy == "OFF" & dormancyEndDate < today & pauseGerminationCountDown == 0 &
senescenceCountDown < 1 & pirFull == "NO"){
  for(sp in 1:nrow(datCover)){ #computation for each seed species + # sp == species
    sumASWhg <- 0 #must reset these values 0 to avoid compounding
    sumTemphg <- 0 #must reset these values 0 to avoid compounding

    if(datCover[sp,"RNDS"] > 0 & today < springDate & datCover[sp, "season"] == "FALL"){
#once the seed stocks are empty, there will be no more germination
      print("fall check")
      for(date in 1:(today-dormancyEndDate)){ #computation of hydro and thermal time since end
of dormancy
        if(soilWater[date,"ASW1hg"] > datCover[sp,"ASW50"]){
          sumASWhg <- sumASWhg + (soilWater[date,"ASW1hg"]-datCover[sp,"ASW50"])
        }
        if(datClimate[date,"Tsoil"]>datCover[sp,"Tming"]){

```

```

sumTemphg <- sumTemphg + (datClimate[date,"Tsoil"]-datCover[sp,"Tming"])
}
}
propgt <-
((sumASWhg/as.numeric((today-dormancyEndDate)))*datCover[sp,"HT"]/sumTemphg)/datCover[1,
"STDASWmin"] # computes the % of total seed stock that must have germinated
  newlyGerm <- round(propgt*datCover[sp,"NDS"])#the number of seeds that germinated at
time t is proportion of germinated seeds*original number of non-dormant seeds - the number of
non-dormant seeds that have already germinated(=original number of non-dormant seeds - remaining
non-dormant seeds)
  arrayResults[sp,dayCounter,"propGerm"] <- propgt
  arrayResults[sp,dayCounter,"germNumbers"] <- newlyGerm

}else if (datCover[sp,"RNDS"]>0 & today >= springDate & datCover[sp, "season"] ==
"SPRING") {
  for(date in 1:(today-dormancyEndDate)){ #computation of hydro and thermal time since end
of dormancy
    if(soilWater[date,"ASW1hg"] > datCover[sp,"ASW50"]){
      sumASWhg <- sumASWhg + (soilWater[date,"ASW1hg"]-datCover[sp,"ASW50"])
    }
    if(datClimate[date,"Tsoil"]>datCover[sp,"Tming"]){
      sumTemphg <- sumTemphg + (datClimate[date,"Tsoil"]-datCover[sp,"Tming"])
    }
  }
  propgt <-
((sumASWhg/as.numeric((today-dormancyEndDate)))*datCover[sp,"HT"]/sumTemphg)/datCover[1,
"STDASWmin"] # computes the % of total seed stock that must have germinated
  newlyGerm <- round(propgt*datCover[sp,"NDS"])#the number of seeds that germinated at
time t is proportion of germinated seeds*original number of non-dormant seeds - the number of
non-dormant seeds that have already germinated(=original number of non-dormant seeds - remaining
non-dormant seeds)
  arrayResults[sp,dayCounter,"propGerm"] <- propgt
  arrayResults[sp,dayCounter,"germNumbers"] <- newlyGerm
}else{
  newlyGerm <- 0
}
if(sp == 1){
  gt<- newlyGerm #at each cycle through the germination loop the old gt data will be erased
}else{
  gt <- c(gt, newlyGerm) #gt is the vector saving all the germinated seeds for that day
}

datCover[sp,"RNDS"]<- datCover[sp,"RNDS"] - newlyGerm
if(datCover[sp, "RNDS"]-gt[sp] < 0){ #ensuring that there are not more germinated seeds
than actual seeds available
  gt[sp] <- datCover[sp,"RNDS"]
}

```

```

datCover[sp,"RNDS"] <- 0
}
}

for(spot in 1:length(gt)){ #this loop ensures only cohorts for which at least 1 seed of 1 species
has germinated are included, if no seeds have germinated then gt is not saved
  if(gt[spot]>0){
    positiveGermination <- "YES"
  }
}

if(positiveGermination == "YES"){ #only cohorts with germinated seeds are saved to
germCohorts
  if(germinationCounter==0){ # this loop replaces the NA in the first column of germCohorts if
it is the first time that germination is computed
    for(spot in 1:length(gt)){
      germCohorts[spot,1]<-gt[spot] #germCohorts saves the number of germinated seeds per date
for later operations
    }
    colnames (germCohorts)[1] <- dayCounter
  }else{
    germCohorts<-cbind(germCohorts,gt) #germCohorts saves the number of germinated seeds
per date for later operations
    for(i in (ncol(germCohorts))){ #renaming columns by numbers of days past in the simulation
colnames(germCohorts)[i] <- dayCounter
    }
  }
  germinationCounter <- germinationCounter + 1
  print(paste("germ count", germinationCounter))
}
  positiveGermination <- "NO" #reset this value for next loop
}

# ~~~~~
~
# Module #GROW1 : Plant growth model choice |
-----

# ~~~~~
~

if(dayCounter == 1){ #only computed on the first day (speed up program)
  for(i in 1:ncol(datCover)){
    if(colnames(datCover)[i]=="LSS") {

```

```

    growthMethod <- 1 #LAI growth model choice
  }else{
    growthMethod <- 0 #dryweight growth model choice
  }
}

# ~~~~~
# Module #GROW2 : Dry weight growth method for inter-rank plant cover |
-----

# ~~~~~

# ~~~~~
# Module #GROW3 : Dry weight growth method with integrated EDD computations for inter-rank
plant cover | -----

# ~~~~~
#
if(growthMethod == 0 & senescenceCountDown < 1 & germinationCounter >= 1 ){ #this method is
only used in the absence of the LLS parameter : when growthMethod == 0, + when growth is put on
hold when post emergence herbicide has been applied + if there is still space for plant growth
  #resizing the matrices based on the number of germinated cohorts
  if(ncol(lnGrowthCohorts) < ncol(germCohorts)){
    counter <- 0
    for (i in 1:(ncol(germCohorts) - ncol(lnGrowthCohorts))){
      x <- 1:nrow(lnGrowthCohorts)*0
      lnGrowthCohorts <- cbind(lnGrowthCohorts, x) #we add a vector as long as the number of
rows of lnGrowthCohorts to the lnGrowthCohorts columns until ncol(lnGrowthCohorts) ==
ncol(germCohorts)
      counter <- counter + 1
    }
    colnames(lnGrowthCohorts) <- colnames(germCohorts)
  }

  if(ncol(growthCohorts) < ncol(germCohorts)){
    counter <- 0
    for (i in 1:(ncol(germCohorts) - ncol(growthCohorts))){
      x <- 1:nrow(growthCohorts)*0

```

```

    growthCohorts <- cbind(growthCohorts, x) #we add a vector as long as the number of rows of
growthCohorts to the growthCohorts columns until ncol(growthCohorts) == ncol(germCohorts)
    counter <- counter + 1
  }
  colnames(growthCohorts) <- colnames(germCohorts)
}

if(ncol(EDD) < ncol(germCohorts)){
  counter<-0
  for (i in 1:(ncol(germCohorts) - ncol(EDD))){
    x <- 1:nrow(EDD)*0
    EDD <- cbind(EDD, x)#we add a vector as long as the number of rows of EDD to the EDD
columns until ncol(EDD) == ncol(germCohorts)
    counter <- counter+1
  }
}
#computation of plant distribution on day d
print("raise 1")
nbplants <- NA #vector that stores the number of each plants for each species that has already
germinated
for (ro in 1:nrow(germCohorts)){
  if (is.na(nbplants[1])==T){
    print("i1")
    nbplants <- sum(growthCohorts[ro,])
  }else{
    print("i2")
    nbplants <- c(nbplants, sum(growthCohorts[ro,]))
  }
}

#comutation of parameters for plant shading effects (phi)
print("raise 2")
st <- NA
shade <- NA
for (sp in 1:nrow(growthCohorts)){
  if (is.na(st[1])==T){
    st <- sum(growthCohorts[sp,])*datCover[sp,"LAR"]
  }else{
    st <- c(st, sum(growthCohorts[sp,])*datCover[sp,"LAR"])
  }
}
for (co in 1:length(st)){
  if(is.na(shade) == T){
    shade <- st[co]*datCover[co,"K"]*nbplants[co]/sum(nbplants)
  }else{
    shade <- c(shade, st[co]*datCover[co,"K"]*nbplants[co]/sum(nbplants))
  }
}

```



```

    }
  }

#computation of mean shading effect factor
meanShade <- mean(shade)

#computation of plant shadeing effect phi
phi <- (1 - exp(-meanShade))/(meanShade)

#computation of EDD
print("raise 3")
v_EDD <- NA
for (sp in 1:nrow(datCover)){
  if (is.na(v_EDD) == T){
    v_EDD <-
1/(((datClimate[dayCounter,"T"]-datCover[sp,"Tb"])^(-1))+meanShade*datCover[sp,"q"]*datClimate
[dayCounter,"I"])
  }else{
    v_EDD <- c(v_EDD,
1/(((datClimate[dayCounter,"T"]-datCover(sp,"Tb"))^(-1))+meanShade*datCover[sp,"q"]*datClimate
[dayCounter,"I"]))
  }
}
print("raise 4")
for (sp in nrow(lnGrowthCohorts)){
  for (co in ncol(lnGrowthCohorts)){
    if (lnGrowthCohorts[sp,co] == 0){
      if(germCohorts[sp,co] > 0){
        lnGrowthCohorts[sp,co] <- log(datCover[sp,"w0"]) + v_EDD[sp]*datCover[sp,"RGR"]
        growthCohorts[sp,co] <- exp(lnGrowthCohorts[sp,co])
      }else{
        growthCohorts[sp,co] <- 0
      }
    }else{
      lnGrowthCohorts[sp,co] <- lnGrowthCohorts[sp,co] + v_EDD[sp]*datCover[sp,"RGR"]
      growthCohorts[sp,co] <- exp(lnGrowthCohorts[sp,co])
    }
  }
}
}

#~~~~~
~
# Module #GROW4 : LAI growth method for inter-rank plant cover |
-----

```

```

# ~~~~~
~
#Total leaf area module
for (sp in 1:nrow(growthCohorts)){ #sp == species
  for (co in 1:ncol(growthCohorts)){ #co == cohorts
    TLAI <- TLAI + datCover[sp,"LAR"]*growthCohorts[sp,co]
    datResults[dayCounter,"totalDryWeight"] <- datResults[dayCounter,"totalDryWeight"] +
growthCohorts[sp,co]
  }
}
if(is.na(TLAI) == T){
  TLAI <- 0
}
STLAI <-c(STLAI,TLAI)
datResults[dayCounter,"STLAI"] <- TLAI

#computing the number of growth cohorts
nbGrowthCohorts <- nrow(growthCohorts)*ncol(growthCohorts)

```

```

# ~~~~~
~
# Module #TRT1 : checking for treatment date |
-----

```

```

# ~~~~~
~
  ifelse (is.na(datGround[1, "mowingheight"]) == F, activationMowingHeight <- "ON",
activationMowingHeight <- "OFF")
  ifelse (is.na(datGround[1, "mowingdate"]) == F, activationMowingDate <- "ON",
activationMowingDate <- "OFF")
  ifelse (is.na(datGround[1, "preemergenceheight"])==F, activationPreEmergenceHeight <- "ON",
activationPreEmergenceHeight <- "OFF")
  ifelse (is.na(datGround[1, "preemergencedate"])==F, activationPreEmergenceDate <- "ON",
activationPreEmergenceDate <- "OFF")
  ifelse (is.na(datGround[1, "postemergenceheight"])==F, activationPostEmergenceHeight <- "ON",
activationPostEmergenceHeight <- "OFF")
  ifelse (is.na(datGround[1, "postemergencedate"])==F, activationPostEmergenceDate <- "ON",
activationPostEmergenceDate <- "OFF")

```

```

# ~~~~~
~
# Module #TRT2 : MOWING | -----

```

```

#~~~~~
~
  if(activationMowingDate == "ON"){ #if the mowing date is reach, plant cover height (expressed as
an area in m^2) is reduced to LAIres the residual cover after treatment
    for (dt in 1:nrow(datGround)){ #dt == data
      if (datGround[dt,"mowingdate"] == today){
        TLAI <- LAIres
        for(sp in 1:nrow(growthCohorts)){ #sp == species
          for (co in 1:ncol(growthCohorts)){ #co == cohorts
            if(growthCohorts[sp,co]>LAIres/nbGrowthCohorts){ #if the residual cover after mowing is
higher than the actual height of a cohort, that cohort keeps its original height (the blades of the grass
mower are too high to cut it)
              growthCohorts[sp,co] <- LAIres/nbGrowthCohorts
            }
          }
        }
        break
      }
    }
  }
}

```

```

  if(activationMowingHeight == "ON" & TLAI >= datGround[1,"mowingheight"]){ #if plant cover
reach an area threshold expressed in m^2, mowing is activated and plant cover is reduced to residual
LAI
    TLAI <- LAIres
    for(sp in 1:nrow(growthCohorts)){ #sp == species
      for (co in 1:ncol(growthCohorts)){ #co == cohorts
        if(growthCohorts[sp,co] > LAIres/nbGrowthCohorts){ #if the residual cover after mowing is
higher than the actual height of a cohort, that cohort keeps its original height (the blades of the grass
mower are too high to cut it)
          growthCohorts[sp,co] <- LAIres/nbGrowthCohorts
        }
      }
    }
  }
}

```

```

#~~~~~
~
# Module #TRT2 : Pre emergence treatment |
-----
#~~~~~
~

```

```

if(activationPreEmergenceDate == "ON"){ #if the preemergence herbicide application date is
reached, pre emergence herbicide is applied and germination will be stopped
  for (dt in 1:nrow(datGround)){ #dt == data
    if (datGround[dt,"preemergencedate"] == today){
      pauseGerminationCountDown <- pauseGerminationCountDownDuration
      break
    }
  }
}

```

```

if(activationPreEmergenceHeight == "ON" & TLAI >= datGround[1,"preemergenceheight"]){ #if
plant cover reach an area threshold expressed in m^2, mowing is activated and plant cover is reduced
to residual LAI
  pauseGerminationCountDown <-145
}

```

```

#germination pause countdown
if(pauseGerminationCountDown > 0){
  pauseGerminationCountDown <- pauseGerminationCountDown - 1
}

```

```

#~~~~~
~
# Module #TRT3 : Post emergence treatment |
-----

```

```

#~~~~~
~
if(activationPostEmergenceDate == "ON" & inProcess == "NO"){ #if the postemergence herbicide
application date is reached, plant cover height (expressed as an area in m^2) is reduced to LAIres the
residual cover after treatment
  for (dt in 1:nrow(datGround)){ #dt == data
    if (datGround[dt,"postemergencedate"] == today){
      senescenceCountDown <- countDownDuration
      inProcess == "YES"
      break
    }
  }
}

```

```

if(activationPostEmergenceHeight == "ON" & TLAI >= datGround[1,"postemergenceheight"] &
inProcess == "NO"){ #if plant cover reach an area threshold expressed in m^2, postemergence
herbicide application is activated and plant cover is reduced to residual LAI
  senescenceCountDown <- countDownDuration
  inProcess <- "YES"

```

```
}
```

```
# ~~~~~
```

```
~
```

```
# Module Senescence: cover senescence countdown |
```

```
-----
```

```
# ~~~~~
```

```
~
```

```
if(senescenceCountDown > 1){  
  senescenceCountDown <- senescenceCountDown - 1  
  for(sp in 1:nrow(growthCohorts)){ #sp == species  
    for (co in 1:ncol(growthCohorts)){ #co == cohorts  
      growthCohorts[sp,co] <- growthCohorts[sp,co]*(1-reductionLAI)  
    }  
  }  
}
```

```
if (senescenceCountDown == 1){  
  senescenceCountDown <- senescenceCountDown - 1  
  TLAI <- 0  
  inProcess <- "NO"  
  for(sp in 1:nrow(growthCohorts)){ #sp == species  
    for (co in 1:ncol(growthCohorts)){ #co == cohorts  
      if(growthCohorts[sp,co]>LAIres/nbGrowthCohorts){ #if the residual cover after mowing is  
higher than the actual height of a cohort, that cohort keeps its original height (the blades of the grass  
mower are too high to cut it)  
        growthCohorts[sp,co] <- LAIres/nbGrowthCohorts  
      }  
    }  
  }  
}
```

```
#max TLAI method  
if(TLAI >= datGround[1, "pir"]){  
  pirFull <- "YES"  
}else{  
  pirFull <- "NO"  
}
```

```
#saving useful data
```

```
datResults[dayCounter,"propGerm"] <-  
(sum(datCover$numberofplants)-sum(datCover$RNDS))/(sum(datCover$numberofplants))  
datResults[dayCounter,"TRNDS"] <- sum(datCover$RNDS)  
}
```