

## **Mémoire**

présenté par

**Marion GUEROU**

Master Agrosociences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt  
Parcours « De l'Agronomie à l'Agroécologie »

# **Conception de successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants en maraîchage sous abris froids à l'aide de l'outil informatique ROTAT**

Pour l'obtention du diplôme de  
Master Agrosociences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt

Maître de stage : Claire Lesur-Dumoulin  
Enseignant responsable du stage : Agnès Lelièvre

Soutenu le 10/07/2020

# Engagement de non plagiat

## 1 Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

## 2 Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

**3 Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

## 4 Engagement :

Je soussigné (e) Marion GUEROU

Reconn t avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Al nya le 30/06/2020



## Résumé analytique

En France, le maraîchage représente 10% des exploitations agricoles mais seulement 1% de la surface. Cependant, ce secteur est très important pour la production agricole française du fait de ses spécificités qui empêchent sa comparaison à d'autres systèmes culturaux : plusieurs cultures par année et nombre de cultures variable par an (Hutin, 2016). Le maraîchage, qu'il soit de plein champ ou sous abri, suit la tendance globale du secteur agricole à la spécialisation et l'intensification (Jeannequin et al., 2005) et ce, malgré la durabilité apportée aux systèmes de production par des rotations plus longues et plus diversifiées (Vereijken, 1997).

Le stage, financé par le GIS PIClég et réalisé en collaboration avec le CTIFL et l'ITAB, est un préambule au projet Interlude qui aura pour objectif de déterminer quels sont les changements nécessaires à différentes échelles de la filière pour que les successions de cultures longues et diversifiées puissent devenir intéressantes pour l'ensemble des acteurs concernés. En lien avec le contexte ci-dessus, il s'inscrit dans une logique d'aide à la diversification des filières et d'augmentation de leur durabilité. L'objectif du stage est ainsi de faciliter la conception de successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants en maraîchage sous abris froids à l'aide de l'outil informatique ROTAT (Dogliotti et al., 2003).

Le choix de l'outil ROTAT parmi les autres générateurs de rotations disponibles (ROTOR (Bachinger et Zander, 2007), Croprota (Schönhart et al., 2011) et Cropsyst (Stockle et al., 2003)) est dû au fait que ROTAT semblait être le plus à même de générer des rotations originales et de les évaluer (temps de travail, marge, besoins en intrants) tout en gérant les impératifs agronomiques des cultures (dates de plantation et récolte, interculture, délai de retour, etc.) et en conservant une part de règles décisionnelles retranscrivant les objectifs de l'exploitation considérée. Cependant, avant le stage ROTAT n'avait encore jamais été utilisé dans le contexte du maraîchage sous abris froids, ce qui a conduit à l'établissement de la problématique suivante : « Comment adapter l'outil informatique ROTAT au maraîchage sous abris froids et le paramétrer pour concevoir des successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants ? »

Pour répondre à cette question, le stage a été découpé en trois points principaux : la conception de la base de données pour l'alimentation de ROTAT, le paramétrage de l'outil et de la base de données et la réalisation d'un cas d'étude (système LongAB de l'expérimentation système DEPHY ECOPHYTO 4Sysleg) permettant d'évaluer la diversification permise par l'outil. Pour documenter et avancer dans chacune de ces étapes, le choix a été fait de s'appuyer sur de la bibliographie mais également sur de nombreux savoirs d'experts indispensables en raison du faible degré de théorisation et de formalisation des données recherchées.

Le travail réalisé a permis la conception d'une base de données de cultures contextualisée (en fonction de la surface en maraîchage d'une exploitation, du type d'agriculture pratiqué et du circuit de commercialisation visé) et dont les sources d'informations sont tracées. Par ailleurs un travail important a été réalisé en vue de la rendre collaborative à moyen terme et d'en faire ainsi un outil de référence et de partage du savoir. La partie paramétrage quant à elle a fait émerger la notion de délai de retour pour des cultures à bioagresseurs communs. Il s'agit d'un délai de retour transcendant le niveau « famille » et ayant pour objectif de limiter la propagation des bioagresseurs telluriques par la non répétition des cultures qu'ils affectionnent. Enfin, le cas d'étude a permis de conclure à l'intérêt de ROTAT dans le cas du maraîchage sous abris froids mais a mis en évidence des points d'améliorations importants tels que :

- la nécessité de prendre en compte la variabilité,
- l'adaptation paramétrique nécessaire afin d'intégrer les contraintes propres au maraîchage sous abri.

En particulier, un effort de contextualisation a été amorcé et doit être poursuivi afin de tenir compte des grandes variabilités de temps de travail et de marge induits par les choix des maraîchers (circuit de commercialisation, date de plantation, recours aux traitements, etc.).

En conclusion, le stage a permis de valider le potentiel de ROTAT dans le cadre de la conception de rotations de cultures longues, diversifiées et économes en intrants mais l'outil, la base de données et le paramétrage doivent encore être travaillés pour parvenir à un résultat pleinement satisfaisant.

## Executive summary

Design of long, diversified and low input rotations in market gardening under cold shelters using the ROTAT computer tool

In France, market gardening represents 10% of the total agricultural farms but only 1% of the agricultural surface. Market gardeners are still very important producers giving that many cultural successions are made in a year in market gardening instead of one for the other types of cultures (Hutin, 2016). As for the global trend in agriculture, practices of under-shelter market gardeners tend to specialise and intensify (Jeannequin et al., 2005) whereas long and diversified cultural rotations are key to the sustainability of agricultural systems (Vereijken, 1997).

The internship is a result from the DiverIMPACTS project coordinated by INRAE. It is funded by the GIS PIClég and made in collaboration with CTIFL and ITAB. It is a preliminary to the Interlude project, which objective will be to identify, at each sector level, the levers to make long and diversified rotations profitable to any implied stakeholder. In connection with the explanations above, its logic is to help enhancing the sector diversification thus increasing its durability. The internship proper objective is to facilitate the conception of long, diversified and low input rotation in the context of under cold shelter market gardening with the help of the ROTAT computing tool (Dogliotti et al., 2003).

In the range of existing rotation designing tools (ROTOR (Bachinger et Zander, 2007), Croprota (Schönhart et al., 2011) et Cropsyst (Stockle et al., 2003)), ROTAT was chosen because of its presumed ability to generate unusual rotations and evaluate it (nitrogen needs, capacity of cover, gross margin and needed amount of labour) while managing agronomic rules (sowing and harvesting dates, intercrop) and rules defined by “expert knowledge” and expressing the market gardener objectives (maximum number of species, sequence and frequency restrictions, etc.). However, in the beginning of the internship, the ROTAT tool had never been used in an under-shelter market gardening context or in the specific objective of creating long, diversified and low input rotations. Hence, the question the internship is willing to answer is: “How can ROTAT be adapted and parametrised for designing long, diversified and low input rotations for under-shelter market gardening?”.

In order to answer the question, the internship was divided in three major subjects : the ROTAT feeding database conception, the tool and database parametrisation and the LongAB case study taken from the 4Sysleg experimentation and allowing the evaluation of the diversification provided by the use of ROTAT. To help gathering material about those different subjects and moving towards the steps, the choice was made to look for bibliographical references but also to request numerous expert knowledge advices since they are the real knowledge keepers giving the lack of theorisation and formalisation of the data in these fields.

The work achieved during the internship lead to a contextualised crop database (according to the market gardening surface size of a farm, the practiced agricultural style and the aimed marketing channel type) which informations sources are traced. An important effort has also been made in order to make the database collaborative in a medium term and a helpful tool to collect and share knowledge. The work on the parametrisation subject led to the notion of minimum period repeat for crops sharing sensitivity to a specific pest. This notion goes beyond the classical “family” period repeat and aims at decreasing the infestation risk by not repeating the sensitive crops. Finally, the case study conclusions validated the interest of ROTAT in the context of conceiving long, diversified and low input rotation for under cold shelter market gardening. It also highlighted some important improvement ways such as :

- the need for variability consideration,
- the parametric adaptation necessary to manage under shelter market gardening particularities.

About this last topic, a contextualisation effort has been started and has to be continued to take into account the great variability in labour time and gross margin induced by some market gardeners choices (market channel, sowing date, treatment use, etc.).

As a conclusion, the internship confirmed the potential usefulness of ROTAT in designing long, diversified and low input rotations in the context of under cold shelter market gardening. However, the computing tool the database and the parametrisation still need to be processed before giving their best results.



## Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier, Claire Lesur-Dumoulin pour son accompagnement sans faille tout au long de ce stage et ses conseils toujours avisés et ce, malgré les péripéties multiples de ce début d'année.

Un remerciement particulier également à Walter Rossing et Jeroen Groot (Wageningen University) pour la mise à disposition de l'outil ROTAT, leurs réponses rapides à nos questionnements et la mise à disposition de nouvelles versions de l'outil.

Je souhaite également remercier l'ensemble des membres du comité de pilotage pour leur investissement dans ce projet et leur soutien tout au long du stage : Marion Casagrande (ITAB), Cathy Eckert (CTIFL), Amélie Lefèvre (INRAE) et Mireille Navarrete (GIS PIClég).

Merci à Dominique Blancard (INRAE) pour son expertise et son implication dans la conception des groupes de cultures à bioagresseur commun.

Je remercie aussi l'ensemble de l'unité de l'INRAE d'Alénya pour son accueil durant le stage et l'implication de chacun à son niveau dans la réussite de ce projet. Un remerciement particulier à Laure et Benjamin pour leur participation à la résolution de certaines des problématiques.

Merci à Agnès Lelièvre pour son accompagnement depuis le début du stage et ses conseils de lecture avisés.

Je souhaite également remercier Alexandra Jullien et Safia Médiène pour l'organisation globale de cette année de master, leur disponibilité et leur gentillesse.

Enfin, un merci à toutes ces personnes invisibles dans ce rapport mais sans qui il n'aurait jamais pu exister.

# Table des matières

Engagement de non plagiat .....	2
Résumé analytique .....	3
Executive summary .....	4
Remerciements .....	6
1. Introduction .....	8
2. Revue de littérature.....	10
2.1. Modélisation des rotations de culture.....	10
2.2. Le modèle ROTAT.....	11
3. Problématique.....	13
4. Matériel et méthode.....	14
4.1. Base de données .....	14
4.2. Paramétrage.....	15
4.3. Cas d'étude : le tunnel LongAB de l'expérimentation système DEPHY EXPE 4Sysleg .....	16
5. Résultats.....	17
5.1. Base de données .....	17
5.2. Paramétrage.....	22
5.3. Cas d'étude : le système de culture LongAB de l'expérimentation système DEPHY EXPE 4Sysleg .....	24
6. Discussion.....	29
7. Conclusion.....	31
8. Bibliographie .....	33

# 1. Introduction

Le maraîchage est défini par l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture (APCA), comme « la production de légumes frais en plein champ et sous abris » (2019). Cette production, associée à celle de fruits, représente 10% des exploitations agricoles françaises pour un peu plus de 1% de la superficie agricole nationale (Hutin C., 2016). Malgré la faible superficie apparente dédiée au maraîchage, la productivité de ces surfaces ne peut pas être comparée telle quelle aux autres exploitations agricoles du fait de la réalisation de plusieurs successions de cultures par an avec des cultures aux rendements variés.

De manière générale, l'ex-région Provence Alpes Côte-d'Azur (PACA) est celle qui concentre le plus d'exploitations légumières spécialisées avec 52% de la surface maraîchère nationale située sur son sol. En comparaison, l'ex-Languedoc-Roussillon représente 4% de la superficie légumière française dont, comme illustré sur la figure 1 ci-après, une majorité de légumes frais (cultivés en plein champ) et de légumes sous serres (Agrete, 2012), cultures définissant le maraîchage. En outre, si l'on se réfère aux données concernant les ex-régions Provence et Languedoc-Roussillon, ces deux territoires regroupent 50% de la surface agricole cultivée sous serres et abris (Jeannequin et al., 2005).

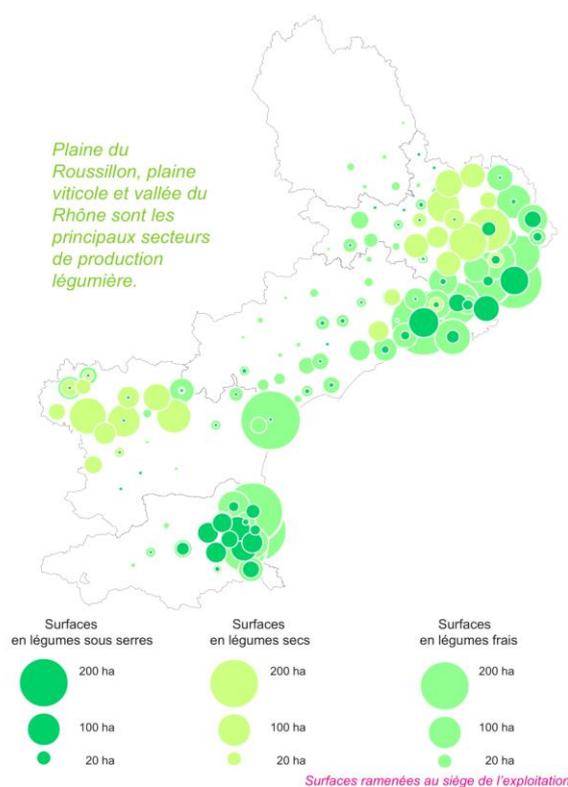


Figure 1 : Localisation cantonale des légumes secs, des légumes frais et des légumes sous serres. Tout en bas, l'ex-région Languedoc-Roussillon. (Agrete, 2012).

En termes de pratiques, le maraîchage, qu'il soit de plein champ ou sous serres et abris, suit l'inclination générale du secteur agricole avec une spécialisation importante des systèmes de production ayant pour effet une nette diminution de la diversité des espèces cultivées. Ainsi, par exemple, six cultures principales peuvent être distinguées sous abri : la salade, la tomate, le melon, le concombre, la courgette et la fraise (Jeannequin et al., 2005). Si cette spécialisation s'explique entre autres par l'enjeu économique et technique que représente l'adoption d'une nouvelle rotation et de nouvelles cultures, Vereijken (1997) a démontré que la baisse de diversité et le raccourcissement des rotations affectaient la durabilité des systèmes de production.

Cet état de faits a conduit l'INRAE à s'intéresser à la problématique via la coordination, depuis 2017 et jusqu'à 2022, du projet DiverIMPACTS dont l'objet est d'exploiter pleinement le potentiel de

diversification des systèmes de culture pour améliorer leur production de services écosystémiques, leur efficacité d'utilisation des ressources et contribuer à la durabilité des filières (Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), 2020). Ce projet, comprend trois objectifs principaux :

- évaluer les performances de la diversification spatiale et temporelle des cultures,
- fournir aux acteurs des territoires les outils et innovations permettant de lever les freins à la diversification des cultures au niveau des exploitations, des filières et des territoires,
- faire des recommandations aux décideurs afin de faciliter la coordination de tous les acteurs concernés au sein des filières.

Afin d'atteindre ces objectifs, le projet DiverIMPACTS s'appuie sur 25 études de cas multi-acteurs réparties en Europe. Pour l'étude de cas située en Roussillon, l'entrée en matière a été réalisée via le deuxième objectif avec l'organisation d'un ensemble d'ateliers collectifs et individuels réalisés en début d'année 2019. Ceux-ci ont permis d'aborder la question de l'accompagnement à plus grande échelle de la diversification. Quatre axes étaient alors envisagés :

- faciliter la construction de propositions radicalement différentes des rotations classiques,
- faciliter la prise en compte des multiples dimensions à intégrer pour construire une rotation en maraîchage sous abris : large choix de cultures, plusieurs cultures par an, différentes périodes de plantation possibles mais des fenêtres de commercialisation parfois très serrées, difficulté à trouver des périodes d'implantation dédiées aux engrais verts, etc.,
- formaliser les connaissances disponibles sur les rotations en maraîchage sous abris froids,
- disposer d'un outil d'accompagnement des maraîchers mais également de conception de rotations expérimentales.

Ce questionnement, situé à l'interface des deux thématiques principales du GIS PIClég (la conception de systèmes de cultures à bas niveaux d'intrants à l'échelle de la parcelle d'une part et le développement de nouvelles actions autour de la diversification et de l'organisation des systèmes à des échelles plus élevées (exploitations, territoire et filières légumières) d'autre part (GIS PIClég, 2018)) a permis le financement du stage par le groupement. Par ailleurs, le CTIFL et l'ITAB ont également été associés à la démarche dans un objectif de partage d'expertise.

Les objectifs dessinés lors des ateliers, associés aux thématiques du GIS PIClég ont abouti à la formulation du sujet de stage « Conception de successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants en maraîchage sous abris froids à l'aide de l'outil informatique ROTAT » comme un préambule au travail qui va être mené dans le Roussillon entre 2020 et 2023 dans le cadre du projet Ecophyto Interlude (Innovations Territoriales pour la Réduction des produits phytopharmaceutiques en production LégUmère Durable) dont l'objectif est de favoriser les réorganisations des acteurs des filières amont et aval à l'échelle de territoires en vue de réduire l'utilisation de produits phytopharmaceutiques.

Au travers du stage, l'objectif est triple :

- Faciliter la conception des successions de cultures en maraîchage sous abris froids,
- Analyser en quoi un outil générant des successions de cultures permet d'aboutir à des propositions fondamentalement différentes de celles proposées à dire d'experts lors d'ateliers de conception
- Formaliser les connaissances disponibles sur les rotations de cultures en maraîchage.

## 2. Revue de littérature

### 2.1. Modélisation des rotations de culture

La détermination des assolements et des rotations de culture est une étape aussi indispensable que complexe dans le cadre de la réflexion entourant une production agricole. De celle-ci découle en effet la charge de travail des agriculteurs, la gestion des ressources environnementales (eau, nutriments, sol, etc.), la gestion des risques liés à l'exploitation (sécurisation des rendements, aléas climatiques, etc.) ou encore la rentabilité de l'exploitation. Il s'agit donc d'une étape cruciale et déterminante dans la vie d'une exploitation, dont la modélisation tend à vouloir réduire les risques.

Le champ d'étude de la modélisation des assolements et des rotations de cultures est en pleine expansion et propose désormais un écosystème complexe d'outils permettant de répondre à diverses problématiques. De façon générale, Brulard (2018) distingue trois types d'objectifs de modélisation :

- pour la définition de nouvelles successions de cultures avec pour objectif l'obtention d'un plan de rotation, c'est-à-dire une affectation des cultures aux parcelles au fil du temps : ces successions peuvent répondre à des objectifs de maximisation du profit (El-Nazer et McCarl, 1986), d'affectation de rotations à des surfaces définies (Costa et al., 2011), de répartition des cultures sur des parcelles hétérogènes en maraîchage (Dos Santos et al, 2010), etc.
- pour l'évaluation multicritères des rotations de cultures : ces modèles peuvent évaluer la durabilité et l'éco-efficience de rotations données (Nemecek et al., 2015), définir la répartition spatiale et temporelle des cultures sur un territoire en maximisant la valeur agronomique des rotations (CropRota : Schönhart et al., 2011), générer des rotations et évaluer leurs impacts environnementaux et économiques (ROTAT : Dogliotti et al., 2004, ROTOR : Bachinger et Zander, 2007), simuler les effets du climat, du sol et de la stratégie de gestion sur la productivité des systèmes de culture et l'environnement (CropSyst : Stockle et al., 2003),
- pour le dimensionnement des équipements productifs et la résolution de problèmes avec coûts et temps fixes séquences-dépendants : ces modèles peuvent avoir pour objectif de sélectionner le meilleur niveau de mécanisation d'une ferme (Søgaard et Sørensen, 2004), aider aux décisions d'investissements en irrigation, faciliter la gestion climatique ou le dimensionnement de la main d'œuvre en vergers (Cittadini et al., 2008).

En complément de cette classification, il est important de noter que les modèles existants peuvent tenir compte de l'espace (assolement) et/ou du temps (succession de culture), peuvent s'intéresser à l'échelle de la parcelle jusqu'au territoire et peuvent répondre à un ou plusieurs objectifs. Cependant, quelle que soit la catégorie considérée, la majorité des modèles de conception de rotations de cultures restent statiques et ne tiennent ainsi pas compte des aléas décisionnels pouvant intervenir en cours de rotation, ce qui est une de leurs limites les plus évidentes (Dury et al., 2012).

Dans le cadre de la conception de successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants, l'objectif du projet est à la fois de générer de nouvelles successions de cultures à l'échelle de l'unité de culture mais également, dans un objectif agroécologique, d'évaluer l'impact de ces successions sur l'environnement, le temps de travail des maraîchers et la marge brute dégagée. En cela, quatre outils candidats présentaient de l'intérêt : ROTAT (Dogliotti et al., 2003), ROTOR (Bachinger et Zander, 2007), CropRota (Schönhart et al., 2011) et éventuellement Cropsyst (Stockle et al., 2003).

Pour rappel, les objectifs du projet étaient de faciliter la conception de rotations originales, faciliter la prise en compte de dimensions décisionnelles multiples, formaliser les connaissances disponibles sur les rotations en maraîchage sous abris froids et enfin de disposer d'un outil d'accompagnement des maraîchers et de conception de rotations expérimentales. Dans ce contexte, les différents outils sélectionnés ci-dessus présentaient les caractéristiques suivantes :

- Cropsyst (Stockle et al., 2003) : l'objectif de cet outil est d'évaluer une rotation selon une séquence de cultures fixée par l'utilisateur avec un fonctionnement à l'échelle d'un fragment de bloc de sol de composition biophysique homogène. Les données générées par l'outil correspondent en réalité au résultat de la simulation de la croissance des cultures au pas de temps journalier et à l'évaluation de l'effet du climat, des sols et des stratégies de gestion des cultures sur la productivité et l'environnement. Ses sorties et son échelle de fonctionnement ne correspondaient donc pas aux objectifs du projet,
- Croprota (Schönhart et al., 2011) : contrairement à Cropsyst, l'outil Croprota génère bien des séquences de cultures sur la base d'une liste prédéfinie, ce qui le rendait plus adapté aux objectifs du projet. Son fonctionnement est adapté aux échelles de la parcelle, de l'exploitation ou encore de la région. Cependant, il a été pensé afin de concevoir des rotations conformes aux successions ayant déjà été observées à l'endroit où les nouvelles rotations doivent être générées. En conséquence, toute notion d'originalité des rotations est exclue lors de son utilisation, ce qui allait à l'encontre des objectifs du projet,
- ROTOR (Bachinger et Zander, 2007) : cet outil est un générateur de rotations à l'échelle du système de culture basé sur la notion d'opérations de production de cultures (« crop production activities » ou CPA) contenues dans une base de données de cultures intégrant les entrées et sorties, le matériel disponible ainsi que le timing des cultures. On retrouve ainsi, pour chaque culture l'itinéraire technique nécessaire à sa conduite qui servira de base à la conception des rotations. L'outil apporte une attention particulière à la gestion de l'azote, des adventices et du risque phytosanitaire. De manière générale, il est très orienté vers les grandes cultures et apporte une grande importance à la construction du rendement ce qui différait des objectifs du stage. Malgré cela, l'outil reste très intéressant du point de vue de la génération de rotations.
- ROTAT (Dogliotti et al., 2003) : l'outil ROTAT permet de générer toutes les rotations possibles à l'échelle du système de culture sur la base d'une liste de cultures et de leurs propriétés renseignée par l'utilisateur pour chaque scénario étudié. La génération de rotations dans ROTAT répond aux impératifs agronomiques des cultures mais également à des règles décisionnelles pouvant être modulées (durée de rotation, interculture, nombre maximal de cultures différentes autorisées dans une rotation, etc.). Enfin, les sorties de l'outil sont évaluées selon différents paramètres stratégiques tels que les besoins en azote, le temps de travail et la marge brute à l'échelle de la rotation. Ainsi, l'outil présentait donc à la fois la capacité à générer des rotations originales la capacité à intégrer de nombreux paramètres décisionnels. De plus, du fait d'une collaboration entre les chercheurs INRAE et son concepteur, il était facilement accessible, ce qui a nettement penché en sa faveur.

En complément de ces caractéristiques correspondant aux objectifs du projet, ROTAT a déjà été utilisé avec succès pour accompagner des fermes familiales en Uruguay comptant entre autres des cultures maraîchères dans la protection des sols contre l'érosion, ce qui en fait un candidat sérieux pour une adaptation à la conception de successions de cultures en maraîchage sous abris froids. En outre, et comme précisé ci-dessus, il semble particulièrement adapté aux objectifs agroécologiques puisqu'il ne tient pas uniquement compte de critères agronomiques mais également de critères sociaux (nombre d'heures de travail) et économiques (marge brute). Enfin, du fait de la collaboration de l'INRAE avec les concepteurs de cet outil (via le projet DiverIMPACTS), son acquisition dans le cadre du projet était grandement simplifiée. Pour toutes ces raisons, l'outil a donc été adopté pour la poursuite du stage.

## 2.2. Le modèle ROTAT

*NB : Toutes les explications ci-dessous découlent de la publication de Dogliotti et al., 2003.*

ROTAT est un outil exploratoire temporel fonctionnant à l'échelle du système de culture. Il permet de générer l'ensemble des successions de cultures possibles à partir d'une liste de cultures prédéfinie dans l'outil et décrites par un ensemble de paramètres agronomiques. Au-delà de ces paramètres, il est

possible pour l'utilisateur de restreindre le nombre de successions possibles en faisant varier des critères décisionnels sur la base d'un savoir expert applicable :

- aux dates stratégiques liées aux cultures :
  - les dates de semis et de récolte peuvent être spécifiées de façon à gérer notamment les cultures avec de longues périodes de récolte ou bien des cultures pouvant être implantées à deux moments différents de l'année,
  - la période minimale d'interculture peut également être définie pour chaque culture, ce qui permet par exemple de tenir compte du fait que le niveau de résidus à traiter ou de travail du sol à faire pour préparer la culture suivante peuvent différer d'une culture à l'autre,
- à la séquence et la fréquence :
  - restrictions de successions de culture : certaines successions peuvent être interdites par l'utilisateur car celles-ci pourraient avoir des effets néfastes sur la qualité physique du sol, la fertilité, etc. Cette fonction peut également servir à éviter des intercultures trop longues ou trop courtes en complément de la « période minimale d'interculture » définie au point précédent,
  - fréquence maximale de chaque culture dans la rotation, fréquence maximale d'un groupe de cultures liées et période minimale avant de répéter une même culture : l'objectif de ces paramètres sont d'éviter l'installation ou la prolifération de bioagresseurs spécifiques à une culture ou un groupe de cultures en empêchant celles-ci de revenir trop souvent dans la rotation. La fréquence peut être gérée en indiquant que la culture ne doit pas représenter plus de x% de la rotation considérée mais également en précisant l'intervalle de temps pendant lequel une culture ne peut revenir dans la rotation. Ces deux méthodes donnent des résultats différents,
- à la faisabilité des successions sur un site spécifique :
  - longueur maximale de la rotation en années : une rotation plus longue étant source de plus de complexité, certaines fermes peuvent choisir de restreindre le nombre d'années d'une rotation,
  - nombre maximal de cultures différentes dans une rotation : dans le même esprit que précédemment, certains maraîchers peuvent souhaiter maintenir un niveau de complexité moins élevé en limitant le nombre de cultures différentes,
  - nombre maximal de cultures principales et nombre maximal de cultures secondaires par rotation : pour des raisons économiques ou d'organisation, l'utilisateur peut également spécifier la part qu'il souhaite conserver de cultures principales et de cultures secondaires. Cela lui permettra de garantir un revenu minimal à l'exploitation concernée par la rotation.

En complément de ces quelques règles explicites de savoir expert, ROTAT restreint le nombre de rotations possibles en limitant le nombre initial de cultures disponibles par simulation (30) et le nombre de combinaisons maximal pouvant être proposé (250 000). Enfin, l'outil élimine d'emblée les duplications de rotations, qu'il s'agisse de répétitions pures (ABC et BCA) ou de multiplications (ABCABC).

En sortie, l'outil ROTAT permet d'obtenir toutes les successions de culture répondant aux critères cités ci-dessus et les évalue sur la base des indicateurs suivants : couverture du sol, structure du sol, besoin en azote, marge brute et nombre d'heures de travail. De cette façon, il est ensuite possible pour l'utilisateur de choisir la rotation la plus en adéquation avec ses contraintes.

Enfin, l'outil fonctionne par « scénarii ». Chaque cas d'étude fait ainsi l'objet d'un scénario dans lequel une liste de cultures spécifique est entrée. Les rotations pour ce scénario n'utilisent donc que la liste renseignée dans le scénario concerné.

### 3. Problématique

Considérant l'ensemble de ces éléments, divers questionnements étaient ouverts en début de stage. Tout d'abord, si l'outil avait déjà été utilisé pour des fermes à petites surfaces en Uruguay comptant des cultures maraîchères, il n'avait encore jamais été mis en œuvre dans le cadre de la conception de successions de cultures en maraîchage sous abris froids, dans le sud de la France. Or, ce type d'agriculture présente de nombreuses spécificités susceptibles de remettre en cause le modèle dont notamment :

- Des systèmes de cultures avec plusieurs cultures par an qui s'enchaînent rapidement,
- Un nombre variable de cultures par an tout au long d'une rotation,
- Des stratégies économiques reposant sur la valorisation de prix « primeurs » ou « tardifs » (i.e. décalés de la période où le gros de la production arrive sur le marché) qui pèsent sur la construction des calendriers de culture,
- Une vigilance accrue concernant les bioagresseurs du fait de la présence de l'abri qui induit un milieu très favorable à leur développement (chaleur et humidité),
- Une surface de culture sous abris généralement restreinte à l'échelle de l'exploitation qui induit une volonté des maraîchers de l'utiliser de manière intensive tout en rentabilisant l'investissement qu'ils représentent : ces deux facteurs combinés conduisent à répéter fréquemment les mêmes espèces, menant à un risque sanitaire élevé.

Il était donc indispensable de déterminer, dans un premier temps, par quels moyens ROTAT pouvait être adapté à ce type de système de production et quelles étaient les modifications de paramétrage à lui apporter afin d'intégrer ses spécificités. Durant le stage, une attention spécifique a été portée au maraîchage sous abris bien que des travaux pourraient également être prévus sur du maraîchage de plein champ.

En complément de cette préoccupation se posait la question de la collecte des informations nécessaires à l'alimentation de ROTAT. Ainsi alors que certains paramètres avaient déjà fait l'objet d'expérimentations et d'études permettant de bénéficier des savoirs acquis, d'autres ont nécessité une réflexion plus profonde afin, d'une part, de déterminer quelle devait être leur définition dans le cadre de leur intégration au projet et d'autre part, de récolter les informations nécessaires à leur renseignement.

Par ailleurs, une réflexion devait également être menée afin de déterminer la nature des sources à utiliser pour la récolte d'informations mais également sur la manière de tenir compte des hétérogénéités dues aux contextes de production et devant donc être conservées et comment considérer et traiter des hétérogénéités qui ne seraient dues qu'à la diversité des sources. Ainsi alors que certains paramètres pouvaient être considérés constants quel que soit le contexte, d'autres devaient faire l'objet d'adaptations.

D'autre part, le paramétrage de ROTAT est extrêmement modulable, ce qui présente l'avantage de donner lieu à la production de successions de cultures orientées selon les objectifs propres de l'utilisateur grâce à la modulation des paramètres variables (délais de retour, précédents/suivants autorisés, interculture, etc.). En revanche, selon les valeurs choisies pour ces paramètres, il est donc également possible d'aboutir à la conception de successions de cultures intensives, et/ou dégradant les sols, et/ou très demandeuses en intrants, et/ou requérant une main d'œuvre importante, etc. Un autre point d'attention consistera donc à s'assurer que le nouveau paramétrage de ROTAT aboutit principalement à la conception de successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants, en accord avec les principes agroécologiques et l'objectif initial du projet.

Enfin, des questions complémentaires se posent concernant le passage à l'échelle depuis le système de culture jusqu'à l'échelle de l'exploitation ou encore l'intégration de la variabilité de certains paramètres tels que les dates de plantation ou encore la marge brute.

En conséquence, la problématique posée en début de stage peut être formalisée de la façon suivante :

**« Comment adapter l'outil informatique ROTAT au maraîchage sous abris froids et le paramétrer pour concevoir des successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants ? »**

Cette problématique donne lieu à l'émergence de quatre hypothèses :

- Hypothèse n°1 : L'outil ROTAT peut être adapté au maraîchage sous abris froids.
- Hypothèse n°2 : Les données nécessaires au paramétrage de ROTAT pour le maraîchage sous abris froids sont disponibles.
- Hypothèse n°3 : Certaines successions de cultures proposées par ROTAT diffèrent substantiellement des pratiques actuelles.
- Hypothèse n°4 : Certaines successions de cultures produites par l'outil ROTAT sont plus longues, diversifiées et économes en intrants que celles qui sont actuellement pratiquées sur le terrain.

## 4. Matériel et méthode

Pour répondre à la problématique posée et tester les hypothèses, le stage a été structuré autour de trois grands axes qui seront développés ci-après :

- La base de données,
- Le paramétrage,
- Le cas d'étude : le tunnel LongAB de l'expérimentation 4Sysleg.

### 4.1. Base de données

La base de données a été considérée durant le stage comme le préalable à l'adaptation du modèle ROTAT et est devenue la pierre angulaire de l'objectif de formalisation des connaissances sur les rotations. Sa construction a induit une réflexion forte à la fois sur les aspects de choix des sources mais également sur la manière de rendre cet outil pérenne et réutilisable à d'autres fins que celles de la simulation de rotations de cultures.

En l'occurrence, sa structure a été définie de façon à pouvoir alimenter ROTAT mais aussi à la rendre collaborative, à servir de référence mobilisable et à faciliter la conception et l'évaluation de systèmes de cultures innovants en maraîchage.

La construction de la base de données a démarré par la reprise et la mise en forme des paramètres initialement intégrés à ROTAT. Puis, dans l'objectif d'obtenir une base de données aussi riche que possible, et donc une possibilité accrue d'obtenir des rotations diversifiées, une recherche extensive a été réalisée afin de lister autant de cultures maraîchères que possible. En effet, au contraire d'un contexte de grandes cultures, le nombre de cultures différentes pouvant être envisagé en maraîchage est extrêmement élevé, ce qui justifiait une approche par le nombre.

Une fois la liste établie, une recherche de sources a eu lieu afin, pour chacune, de renseigner tous les paramètres possibles sur la base de la littérature. Une grande attention a été apportée à la fois à la fiabilité des sources et au traçage de la provenance de chaque information renseignée en base de données.

Concernant la fiabilité, la priorité a été accordée aux informations issues d'organismes agricoles professionnels de recherche-développement et/ou de conseil tels que l'ITAB, les Chambres d'Agricultures, Sud&Bio, etc. Cela devait en effet permettre de garantir l'exactitude des informations récoltées et leur adéquation avec une production de type professionnel. Toutefois, dans le cas où les informations ne pouvaient être trouvées dans le cadre défini, des exceptions ont pu être réalisées mais celles-ci ont été identifiées dans la base de données afin que cette information soit visible et identifiable par l'utilisateur.

Enfin, au cours de la recherche de sources, il est rapidement apparu que la culture d'une espèce était grandement liée au contexte de production (taille de l'exploitation considérée, circuit de commercialisation prévu, etc.). Ainsi, alors que certaines espèces pouvaient être envisagées sur de petites exploitations, elles pouvaient être complètement inadéquates dans un contexte de surface maraîchère plus élevée. Par ailleurs si certaines espèces pouvaient être adaptées à des contextes différents, les paramètres qui leur étaient associés (temps de travail et marge notamment) pouvaient varier grandement. De la même façon, le type d'agriculture pratiqué (conventionnel ou biologique) semblait devoir jouer un rôle dans la sélection des espèces cultivées et les paramètres décisionnels qui leurs étaient liés (par exemple, il pouvait avoir un effet significatif sur le délai de retour). Une segmentation a donc été envisagée à dire d'expert afin de gérer au mieux ces hétérogénéités.

## 4.2. Paramétrage

Au-delà de la construction pure de la base de données, l'une des grandes questions soulevées a été celle des paramètres à conserver par rapport aux paramètres initialement disponibles dans ROTAT et des paramètres à ajouter pour retranscrire les particularités des systèmes de production maraîchers et en particulier des systèmes sous abris. Dans le cas où l'ajout de paramètres paraissait nécessaire, une réflexion supplémentaire a été menée afin de déterminer les différentes classes ou bornes pertinentes. Effectivement, afin de simplifier la génération de rotations et la lecture du résultat, l'outil ROTAT fonctionne souvent par classes. Ainsi, les cultures sont par exemple divisées en cinq classes pour les prélèvements d'azote en fonction de leur niveau de besoins (25 à 50 Kg/ha, 50 à 100 Kg/ha, 100 à 150 Kg/ha, etc.).

Cette réflexion, conduite de façon globale sur l'ensemble des paramètres, a impliqué la sollicitation de divers experts ainsi que d'une base de données académique (issue d'un travail du GIS PIClég, 2018) et de données expérimentales issues de projets INRAE.

L'utilisation des données expérimentales a d'ailleurs nécessité une attention particulière car, n'ayant pas été acquises initialement pour répondre au besoin de la base de données, elles nécessitaient d'être compilées et réadaptées au contexte. Pour certaines cela s'est traduit par une sélection des données adéquates et d'une éventuelle pondération. Pour d'autres en revanche, un travail complexe a été nécessaire afin de retrouver des informations à l'échelle de l'espèce depuis des données initialement relevées par groupes de cultures. Cette reconstruction des données a été doublée d'une sollicitation d'experts afin de valider les choix réalisés et la pertinence des informations retirées pour la base de données.

Finalement, la récolte de certaines informations (délais de retour et certaines informations de besoins des cultures en NPK notamment) a simplement été réalisée via une recherche bibliographique et une synthèse des informations techniques provenant de différentes sources.

### 4.3. Cas d'étude : le tunnel LongAB de l'expérimentation système DEPHY EXPE 4Sysleg

*NB : Les informations concernant l'expérimentation système DEPHY EXPE 4Sysleg sont disponibles dans les fiches techniques référencées en bibliographie (Lefèvre A., 2019).*

L'objectif du stage était de concevoir des successions longues, diversifiées et économes en intrants. Par longue, on entend d'une durée supérieure aux successions les plus longues pouvant couramment être observées en maraîchage sous abris dans le Sud de la France, soit 3 à 4 ans. Le qualificatif « diversifié » concerne quant à lui une diversification par rapport à la situation la plus couramment rencontrée sous abris dans le Sud de la France avec l'alternance de cultures issues de deux familles botaniques en été et 2 à 4 familles botaniques en hiver, soit une situation où les délais de retour sont très peu respectés et où les espèces cultivées varient peu d'une année sur l'autre. La diversification pourra ainsi concerner une alternance entre les cultures, les familles de cultures ou entre les groupes de cultures partageant des caractéristiques communes (sensibilité à un bioagresseur commun par exemple) et mettra l'accent sur le respect des délais de retour.

Afin d'arriver à ce résultat, il était nécessaire de réussir à caractériser ces éléments par rapport à une rotation connue afin de déterminer si l'outil avait permis d'obtenir au moins une rotation plus longue, plus diversifiée et plus économe en intrants que la référence.

Pour cela, il a été décidé de s'appuyer sur les données issues de l'expérimentation système DEPHY EXPE 4Sysleg menée par l'unité expérimentale INRAE sur les systèmes maraîchers agroécologiques (UE Maraîchage) entre 2013 et 2018.

Le projet 4Sysleg portait sur la conception et l'évaluation multicritère de 4 SYStèmes et production intégrée de cultures LEGumières sous abri non chauffé, adaptés à différents contextes technico-économiques. Les quatre systèmes de culture mis en expérimentation avaient pour objectif de représenter des contextes de production variés du point de vue de la diversité de cultures, du type d'agriculture pratiqué et du circuit de commercialisation envisagé. Ils sont issus d'une démarche de conception pas-à-pas en partenariat qui a impliquée des scientifiques, des maraîchers et des conseillers. Les cas étudiés étaient les suivants :

- DivAB : maraîchage diversifié en agriculture biologique, conçu pour un débouché en vente directe,
- LongAB : maraîchage diversifié en agriculture biologique, conçu pour un débouché en circuit long visant la vente en GMS,
- DivRED : maraîchage diversifié en protection intégrée, conçu pour un débouché en vente directe,
- LongRED : maraîchage peu diversifié en protection intégrée, conçu pour un débouché en circuit long visant la vente en GMS.

Dans le cadre du cas d'étude choisi pour le stage, il a été décidé de s'intéresser à l'un des systèmes de culture conçu pour la vente en circuit long car souvent, ce type de commercialisation induit une faible diversification et il semblait donc intéressant de comparer les résultats que pourrait obtenir ROTAT en termes de nombre de cultures, nombres d'espèces, temps de travail et marge par rapport à cette référence. Le système de culture LongRED ayant porté sur du maraîchage peu diversifié, il paraissait plus pertinent de s'intéresser au tunnel LongAB afin de comparer la rotation mise en expérimentation et les sorties de ROTAT.

Durant l'expérimentation 4Sysleg, chaque système de culture a été mis en œuvre dans un tunnel de 400 m<sup>2</sup> et les données de fertilisation, irrigation, traitements phytosanitaires, rendements et temps de travail ont été relevées par tunnel. Par ailleurs un travail significatif a été réalisé afin de déduire la marge brute par culture en incluant l'ensemble des paramètres de coûts par culture (Ibgui P., 2019).

Enfin, même si l'expérimentation système a duré de 2013 à 2018, seules les données de 2014 à 2018 ont été retenues dans les calculs et ont donc été considérées dans le cadre du cas d'étude.

Une fois finalisé, l'ensemble des données a été utilisé de deux manières dans le cadre du stage :

- Obtention de la rotation LongAB exacte par l'outil ROTAT afin d'éprouver l'outil et d'obtenir la rotation de référence et son évaluation par ROTAT,
- Obtention de nouvelles rotations de cultures pouvant être comparées à LongAB, sur la base de la liste de cultures présentes dans cette rotation de référence.

Le résultat des simulations a fait l'objet d'une comparaison suivant : le nombre de cultures contenues dans une rotation, la marge dégagée et le temps de travail requis. L'aspect d'économie d'intrants a été mis de côté dans un premier temps au vu de la longueur inattendue dans la prise en main de ROTAT.

## 5. Résultats

En cohérence avec les matériels et méthodes déployés et explicités ci-dessus, les résultats du stage peuvent être divisés en trois sous-sujets qui seront développés ci-dessous :

- La base de données,
- Le paramétrage,
- Le cas d'étude : le tunnel LongAB de l'expérimentation système DEPHY EXPE 4Sysleg.

*NB : Du fait du contexte sanitaire inhérent à la période de début 2020 et de la longueur dans la prise en main de ROTAT, les éléments d'évaluation des besoins en intrants ont finalement dû être laissés de côté dans l'analyse des résultats. Ils devraient néanmoins être réintégrés au projet dès que possible.*

### 5.1. Base de données

Comme évoqué plus haut, le travail sur la base de données avait pour objectifs d'obtenir :

1. Une base de données d'alimentation de l'outil ROTAT adaptée au cas du maraîchage sous abris,
2. Un outil collaboratif de formalisation des connaissances sur les rotations et les cultures en maraîchage,
3. Une base de données de référence fiable et faisant apparaître ses sources, mobilisable pour de nombreux projets.

La base de données a été construite de zéro pendant le stage et sous Excel.

Dans le cadre du premier objectif, une réflexion importante a été engagée sur les paramètres afin d'évaluer l'intérêt des paramètres de cultures initiaux de ROTAT vis-à-vis du maraîchage et de les supprimer ou adapter au besoin et d'en imaginer de nouveaux. Ces questionnements, résolus à dire d'experts ont abouti à l'état paramétrique suivant qui est toujours en cours de réflexion afin de préciser les contextes de production avec notamment la question de l'ajout de la notion de plant greffé ou non (ceci pourrait grandement faire varier la sensibilité à certains bioagresseurs pour les plants concernés et influencer sur le délai de retour applicable : typiquement un plant greffé aurait un délai de retour plus court qu'un plant non greffé), le mode de palissage (variation du temps de travail), le mode d'irrigation (variation des besoins en eau et du temps de travail), etc.

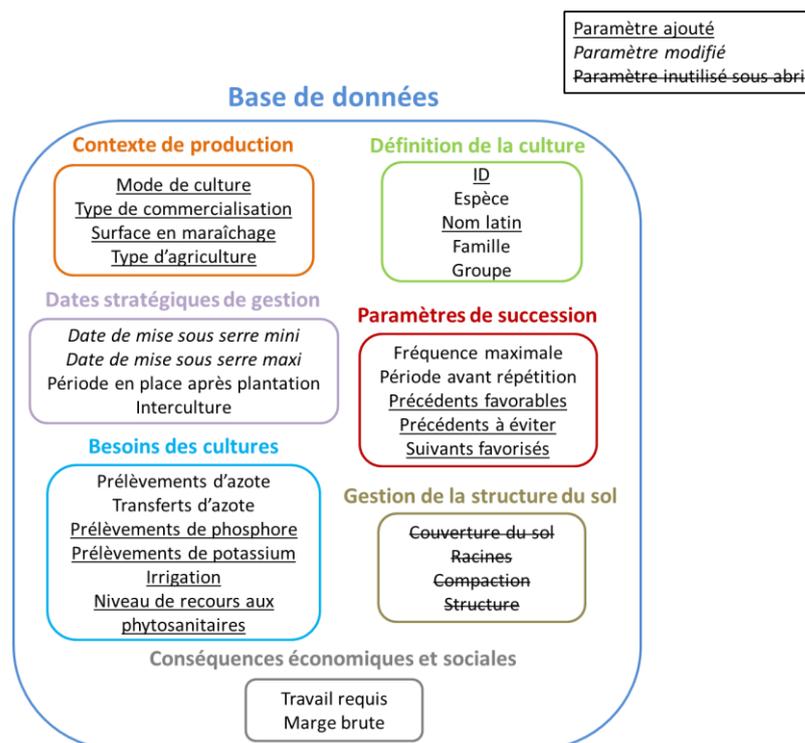


Figure 2 : Schématisation de la base de données et de ses paramètres par rapport aux paramètres initiaux de ROTAT

Le premier élément remarquable vis-à-vis des paramètres ajoutés est l'intégration entièrement nouvelle des éléments de contexte de production. Ces paramètres, dont certains sont encore en cours de réflexion pour enrichir la description du contexte de production, ont pour objectif de préciser les conditions de production des cultures concernées afin d'identifier et de référencer, pour chaque couple culture\*contexte, les éléments de variabilité. Si la notion a semblé très importante dans le cadre du projet, il est cependant peu étonnant qu'elle ait été absente des cas précédemment traités avec l'outil. Effectivement, ces expérimentations étaient, de fait, liées à un contexte spécifique d'exploitation que les chercheurs souhaitent étudier et améliorer sur certains critères ( rosion typiquement). Les données alors utilisées étaient donc implicitement contextualisées et ne nécessitaient pas un référencement aussi fin que dans notre cas.

A ce titre, l'objectif de notre projet est diff rent : il s'agit de concevoir des rotations longues, diversifiées et économiques en intrants dans autant de contextes que possible, à partir d'une base de données extensive. Autrement dit, il est nécessaire de pouvoir identifier dans la base de données quelles informations et quelles lignes de culture peuvent être utilisées dans le contexte particulier dans lequel l'utilisateur se trouve.

En particulier, la construction des éléments de contexte a mené à une différenciation :

- Des modes de culture : sous abri ou en plein champ avec une réflexion en cours pour l'ajout de critères tels que « sous chenilles ». Le mode de culture influe grandement sur les dates stratégiques de gestion des cultures, le rendement, et le degré de mécanisation qui se répercute directement sur le temps de travail et la marge,
- Des types de commercialisation : en vente directe, circuit court à 1 intermédiaire ou circuit long. Ces critères affectent de manière significative la marge et le temps de travail accordé aux cultures. Ils ont été construits en cohérence avec les réflexions ayant eu cours sur le projet 4Sysleg auquel se rapporte notre cas d'étude,
- Des surfaces maraîchères cultivées : grande (> 5 ha), moyenne ([1,5 , 5] ha) ou petite (< 1,5 ha). La notion de surface maraîchère a été ajoutée afin de tenir compte des différences de

gestion des cultures induites par la variation de la surface cultivée en maraîchage : variation des dates stratégiques de gestion des cultures (date de plantation, durée de culture, etc.) influant sur la marge brute et le temps de travail, degré de mécanisation (influant sur le temps de travail, etc. Les bornes ont été déterminées par un croisement de références bibliographiques et de dires d'experts,

- Du type d'agriculture pratiqué : agriculture biologique ou conventionnelle. Un des questionnements les plus stratégiques traité durant le stage était celui du délai de retour. Or, selon le type d'agriculture pratiqué, celui-ci est considéré avec plus ou moins d'importance et appliqué de façon plus ou moins stricte. Il nous a donc paru essentiel d'ajouter la distinction entre ces deux types d'agriculture.

Outre l'ajout du contexte de production, le travail réalisé sur la base de données a conduit à l'ajout de paramètres de besoins des cultures (prélèvements de phosphore et potassium, des besoins en irrigation et du niveau de recours aux produits phytosanitaires) et la précision des paramètres de succession (ajout des précédents/suivants favorables et à éviter).

D'autre part, le paramètre de dates de plantation (fixé à un jour spécifique dans ROTAT) a été élargi de façon à comprendre une date minimale et une date maximale de plantation, permettant ainsi d'intégrer la variabilité inhérente à ce type d'information à la fois dépendante des conditions météorologiques mais également des impératifs des agriculteurs. Il s'agit néanmoins d'un point de discussion important car ROTAT n'intègre que très difficilement la variabilité des informations.

Enfin, le dernier point remarquable dans les paramètres est la non utilisation de ceux liés à la gestion de la structure du sol et aux risques de transferts d'azote. En effet, dans le cas du maraîchage sous abris, il existe peu de risques d'érosion ou de lessivage, l'ensemble des éléments aériens des cultures sont exportés et la compaction n'est pas un enjeu majeur. Ces paramètres ont donc été laissés de côté pour le cas d'étude traité pendant le stage. Cependant, dans l'optique de traiter le cas du maraîchage de plein champ dans la base de données, les colonnes ont été conservées pour susciter la discussion.

Finalement, à l'issue de la réflexion sur les paramètres, la base de données a été divisée en 6 onglets différents (GS\_AB, GS\_CONV, MS\_AB, MS\_CONV, PS\_AB, PS\_CONV) différenciés par le contexte de production :

- la surface maraîchère cultivée dont ils représentent le modèle :
  - Petite : <1,5 ha (PS)
  - Moyenne : [1,5 ha , 5 ha] (MS)
  - Grande : >5 ha (GS)
- le type d'agriculture pratiqué :
  - agriculture biologique (AB)
  - agriculture conventionnelle (CONV)

Chaque onglet contenait ensuite un tableau identique de tous les autres paramètres pouvant être complété avec les lignes de cultures et leurs paramètres contextualisés. Afin de faciliter le remplissage de la base de données et lui conférer le caractère collaboratif propre au deuxième objectif, un travail conséquent a été réalisé.

Celui-ci a consisté en la conception d'un onglet spécifique d'assistance à l'insertion de nouvelles lignes de cultures dans un ou plusieurs onglets simultanément ainsi que dans la rédaction d'un mode d'emploi détaillant le fonctionnement de la base de données dans son ensemble à des fins de consultation simple, d'ajout de nouvelles lignes, de développement de nouvelles fonctionnalités ou encore de réalisation de simulations sur ROTAT.

La conception de l'onglet d'assistance à l'ajout de nouvelles lignes a conduit à la création d'un onglet en deux tableaux associés à des macros et permettant d'une part de remplir les données associées à une (ou plusieurs) nouvelle(s) ligne(s) de culture(s) et d'autre part de renseigner à quel(s) onglet(s) chaque ligne est destinée avant de l'insérer automatiquement dans l(es) onglet(s) cible(s), voir figure ci-dessous.

CARACTERISTIQUES DES CULTURES A INSERER EN BASE DE DONNEES								
Ajouter une ligne de saisie	ID (Espèce_Mode de culture_Type de commercialisation)	Espèce	Nom latin	Famille	"Groupe"	Mode de culture	Date mise sous serre mini	
							Date	n° de jour
Supprimer une ligne de saisie	__Espèce A_SA__	Espèce A			4Sysleg	Sous abri	20-mars	80
DESTINATION DES INSERTIONS DE LIGNES DE CULTURE <span style="float: right;">Insérer les lignes</span>								
Grande surface maraîchère (> 5 ha)			Moyenne surface maraîchère ([1,5 ha , 5 ha])		Petite surface maraîchère (< 1,5 ha)			
Agriculture Biologique		Agriculture Conventiennelle	Agriculture Biologique	Agriculture Conventiennelle	Agriculture Biologique	Agriculture Conventiennelle		
__Espèce A_SA__		Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
		Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non

Figure 3 : Capture d'écran de l'onglet d'assistance à l'insertion de nouvelles lignes de cultures dans les divers onglets de base de données

Cet effort d'ergonomie et de facilitation de l'intégration de nouvelles cultures a suscité un vif intérêt des membres du comité de pilotage (COPI) et a ouvert des perspectives importantes d'enrichissement collaboratif de la base de données. De plus amples réflexions sont en cours afin de renforcer encore l'ergonomie de la base de données et de permettre un remplissage collaboratif qui ne compromette pas l'intégrité des fonctionnalités ou la fiabilité des données. En particulier, le mode d'emploi de la base de données doit être complété et d'éventuelles restrictions de modifications sont en réflexion.

En outre, en lien avec le troisième objectif de valorisation de la base de données en qualité de référence mobilisable, la question se pose de la détacher du contexte de ROTAT afin de construire une ressource plus générique et moins liée aux paramètres de l'outil, ce qui permettrait une mobilisation plus large.

Dans l'attente de l'aboutissement de cette réflexion, un effort particulier a été apporté au traçage des sources afin de garantir qu'il advienne la fiabilité des informations et la capacité de l'utilisateur à aller plus loin en consultant les sources utilisées pour la récolte d'informations. Ainsi, à chacun des 6 onglets de « Base de données de cultures » (Figure 4) a été lié un onglet « Sources » (Figure 5). Un onglet source comprend initialement un tableau vide reprenant toutes les colonnes de paramètres présents dans l'onglet « Base de données » qui lui est lié. En lignes, chaque onglet reprend tous les identifiants des cultures renseignées dans l'onglet « Base de données » lié. Le principe est, pour chaque paramètre renseigné dans un onglet, d'identifier dans l'onglet « Sources », dans la case correspondante, le numéro de la source utilisée en référence. Chaque source est ensuite elle-même référencée dans un onglet « Liste sources » (Figure 6) correspondant à la bibliographie exhaustive de construction du fichier avec pour chaque source, l'attribution d'un numéro de citation.



En regard des différents objectifs, la structure de la base de données a donc été grandement modifiée depuis ses débuts et devrait continuer à évoluer de façon à en faire un véritable outil de référence. En fin de stage, elle comprenait ainsi 17 onglets répartis selon les fonctions suivantes :

- 1 onglet "Mode d'emploi du fichier" explicitant le fonctionnement du fichier à des fins de consultation simple, d'ajout de nouvelles cultures, de développement de nouvelles fonctionnalités ou encore de réalisation de simulations sur ROTAT,
- 1 onglet "TO DO et QUESTIONS" regroupant les développements à apporter au fichier ainsi que les questions et suggestions à son sujet,
- 1 onglet "Compléter BDDs" d'assistance à l'ajout de nouvelles cultures dans les bases de données,
- 6 onglets "Base de données – XX\_YY" (GS\_AB, GS\_CONV, MS\_AB, MS\_CONV, PS\_AB, PS\_CONV) différenciés par :
  - la surface maraîchère cultivée dont ils représentent le modèle :
    - Petite : <1,5 ha (PS)
    - Moyenne : [1,5 ha , 5 ha] (MS)
    - Grande : >5 ha (GS)
  - le type d'agriculture pratiqué :
    - agriculture biologique (AB)
    - agriculture conventionnelle (CONV)
- 6 onglets "Sources – XX\_YY" répertoriant les sources des données renseignées dans chacun des onglets "Base de données – XX\_YY". Chaque onglet "Sources – XX\_YY " est donc rattaché à un onglet "Base de données – XX\_YY " particulier,
- 1 onglet "Liste sources" qui répertorie l'ensemble des sources citées dans le document et rend ainsi leur citation plus légère,
- 1 onglet "Paramètres" contenant l'ensemble des paramètres des listes déroulantes contenues dans le fichier.

En termes de remplissage, la base de données, entièrement réalisée durant le stage, contient à ce jour, dans chaque onglet, 585 lignes de cultures issues de la liste initialement considérée dont environ 360 par onglet au moins partiellement remplies.

## 5.2. Paramétrage

La notion de paramétrage a concentré de nombreux questionnements et a conduit à des choix stratégiques significatifs dans le cadre de la contextualisation de la base de données. Pour plus de transparence, ces choix ont donc été clairement retranscrits dans le mode d'emploi de la base de données.

En particulier, ceux-ci ont eu cours sur les paramètres nouvellement intégrés par rapport à la liste initiale de ROTAT. Typiquement :

- Pour l'irrigation il a été décidé, pour simplifier la récolte de données, de fixer le mode d'irrigation à l'aspersion en hiver et au goutte à goutte en été. Cette répartition, issue du savoir expert correspond à la tendance majoritaire dans le cadre du maraîchage sous abris,
- Pour les paramètres de fertilisation, les classes de paramètres ont été définies grâce à des références croisées avec un savoir expert afin de segmenter les classes de façon cohérente. Ainsi, pour les prélèvements de phosphore il a été décidé de créer quatre classes partant de 0

Kg/ha avec un pas de 50 Kg/ha tandis que les prélèvements de potassium ont également été divisés en 4 classes partant de 0 Kg/ha mais avec un pas de 100 Kg/ha.

Par ailleurs, d'autres paramètres n'ont sciemment pas été intégrés à la base de données mais ont été définis comme constants dans son élaboration, dans l'attente éventuelle d'être intégrés avec des classes de paramètres. Par exemple, le mode de palissage n'a pas fait l'objet d'une colonne particulière mais peut être précisé dans le nom d'une culture lors de son intégration à la base de données.

De son côté, le paillage en hiver est pour l'instant considéré comme fixé par défaut à l'utilisation d'un paillage plastique standard percé à 14 trous/m<sup>2</sup>, ce qui permet néanmoins d'intégrer des cultures caractérisées par une densité plus faible en plantant un trou sur deux pour obtenir 7 trous/m<sup>2</sup> (cas du chou) ou plus élevées en reperçant des trous. Si cette situation n'est pas idéale en termes d'adaptabilité et d'efficacité, elle permet néanmoins la culture de nombreuses espèces, ce qui a justifié son adoption.

Enfin, l'utilisation de l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) comme indicateur du recours aux produits phytosanitaires est toujours en débat à ce jour. Ainsi, si son intégration a paru un temps évidente afin de caractériser le recours aux traitements phytosanitaires d'une culture donnée selon son contexte de production, il est ensuite apparu que ce recours était en réalité très dépendant du contexte sanitaire du sol, des exigences des filières et des objectifs propres de l'agriculteur. Sans plus de précision sur la gestion de la santé des cultures, il paraissait donc délicat d'inclure l'IFT dans une telle base de données. Au fil de la réflexion, il semble néanmoins qu'il reste intéressant de renseigner le fait que les cultures se caractérisent par des niveaux différents de sensibilité aux bioagresseurs et donc par un risque de recours aux intrants de protection des cultures différents. Il est actuellement envisagé de décrire ceci à l'aide de l'IFT et du Nodu (Nombre de Doses Unités) vert<sup>1</sup> (exprimés en indices) mais aussi du niveau de recours aux auxiliaires de cultures (exprimé en €/m<sup>2</sup>).

Le résultat des réflexions ci-dessus et des celles à venir a fait et fera l'objet d'un partage avec les concepteurs de l'outil ROTAT de façon à adapter au mieux l'outil à ces nouvelles considérations.

Le questionnement le plus important autour du paramétrage a eu lieu au sujet des délais de retour et de la création de « groupes ».

Classiquement, les délais de retours peuvent être envisagés au niveau de la culture (une tomate ne revient pas sur une parcelle avant 4 ans) ou de la famille (une solanacée ne revient pas sur une parcelle avant 3 ans). Cependant, ceux-ci peuvent varier en fonction du contexte pédoclimatique (un navet peut revenir tous les 2 à 3 ans dans un sol à pH élevé mais seulement tous les 3 à 4 ans sur un sol acide), de l'état sanitaire de la parcelle considérée (un chou-fleur peut revenir tous les 3 ans sauf si une hernie des crucifères a été détectée, dans ce cas ce sera plutôt 7 à 8 ans), des objectifs de l'agriculteur qui peut se contenter du délai minimum (un concombre revient tous les deux ans) en dépit du délai idéal (un concombre revient tous les 4 ans) pour des raisons de productivité et de rentabilité (ITAB, 2015) ou encore de certaines techniques de conduite (la solarisation permet, jusqu'à un certain point, de s'affranchir des délais de retour).

En plus de cela, le type d'agriculture (agriculture biologique ou conventionnelle) implique une nécessité plus ou moins grande de respecter les délais de retour. Ainsi, peu de produits de traitements curatifs étant autorisés en agriculture biologique, les délais de retour devront être respectés le plus fidèlement possible pour limiter le risque sanitaire tandis que leur raccourcissement aura moins d'impact en agriculture conventionnelle. Si aucune règle stricte n'a été définie pour la prise en compte de ces considérations, le principe général appliqué est celui de la conservation d'un délai maximal en agriculture biologique et d'une durée pouvant être aménagée en fonction des objectifs de l'agriculteur

<sup>1</sup> Calculé à partir des données de vente des distributeurs de produits phytopharmaceutiques, le NODU correspond à un nombre de traitements « moyens » appliqués annuellement sur l'ensemble des cultures, à l'échelle nationale. Il s'affranchit des substitutions de substances actives par de nouvelles substances efficaces à plus faible dose puisque, pour chaque substance, la quantité appliquée est rapportée à une dose unité (DU) qui lui est propre. Ainsi, rapporté à la surface agricole utile (SAU), le NODU permet de déterminer le nombre moyen de traitements par hectare. (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2020).

en agriculture conventionnelle. Dans tous les cas, le principe d'allongement des délais de retours en présence d'un bioagresseur tellurique a été conservé.

La gestion des bioagresseurs a par ailleurs donné lieu à une plus ample réflexion étant donnée son importance dans le cadre du maraîchage sous abris. Ainsi, l'expertise indiquant que certains bioagresseurs transcendent les familles phylogénétiques pour toucher un ensemble hétérogène de cultures, l'idée d'exploiter les données disponibles pour concevoir des groupes de cultures sensibles à des bioagresseurs communs et leur adjoindre un délai de retour a émergé. Ce travail avait pour objectif d'aller plus loin que la fonction déjà disponible dans ROTAT en formalisant les groupes de cultures à bioagresseurs communs à partir de la synthèse.

De cette manière, on se retrouve donc avec trois niveaux de délais de retour : culture, famille et groupe. NB : la notion de « groupe » est déjà intégrée naturellement à ROTAT mais peut servir à la confection de groupes de n'importe quelle nature. Typiquement, il est possible de créer un groupe « Engrais verts », un groupe « Salade » ou encore un groupe de cultures sensibles à un bioagresseur spécifique.

Afin de conduire le raisonnement sur la confection des groupes de sensibilité, la base de données de bioagresseurs par culture élaborée en 2014 par le GIS PICléG (GIS PICléG, 2018) a été confrontée à un regard expert afin d'opérer une simplification et de sélectionner uniquement les quatre ou cinq bioagresseurs telluriques les plus significatifs : c'est-à-dire touchant un grand nombre de cultures de familles diverses avec une incidence importante sur le rendement des cultures. La réduction du nombre de groupes retenus tenait à la crainte qu'un nombre de groupes plus important induise des contraintes trop fortes pour permettre la conception de rotations de cultures par l'outil ROTAT ainsi qu'à la crainte de ne pas disposer d'assez d'informations pour le paramétrage d'un grand nombre de groupes (attribution d'un délai de retour à chacun typiquement). Par ailleurs, le choix a été fait de ne pas s'intéresser aux bioagresseurs aériens car ceux-ci ne sont pas inféodés à une parcelle au sens strict tel que peuvent l'être les bioagresseurs telluriques. Leur maîtrise ne peut donc être réellement envisagée par la rotation.

Ce travail a ainsi abouti à la pré-sélection de cinq bioagresseurs : les nématodes à galle (*Meloidogyne*), *Pyrenochaeta* (responsable du corky root), *Rhizoctonia*, *Sclerotinia* et les taupins. Cette liste primaire, établie à dire d'experts avant l'exploitation du fichier du GIS PICléG en collaboration avec un spécialiste, doit encore être validée au regard des résultats obtenus sur ce fichier. Il sera ensuite nécessaire d'identifier, pour chaque bioagresseur, quelles sont les cultures sensibles et quel délai de retour devra être attribué au groupe de cultures concerné.

Ce délai de retour sera défini à la fois en fonction de la fréquence d'apparition du bioagresseur, de la gravité de son effet sur les cultures mais aussi du nombre de cultures touchées. Ce travail doit être poursuivi dans le mois restant du stage.

### 5.3. Cas d'étude : le système de culture LongAB de l'expérimentation système DEPHY EXPE 4Sysleg

Le système de culture LongAB de l'expérimentation 4Sysleg correspond à une rotation en maraîchage diversifié en agriculture biologique, conçu pour un débouché en circuit long visant la vente en GMS. La rotation, issue d'une démarche de conception pas-à-pas en partenariat, contenait sept cultures différentes cultivées sur dix périodes (répétition de trois cultures au cours de la rotation) ainsi que deux types d'engrais verts cultivés sur trois périodes (répétition d'un engrais vert) et deux phases de solarisation, le tout réparti sur cinq ans d'expérimentation. Concrètement, la rotation appliquée était la suivante :

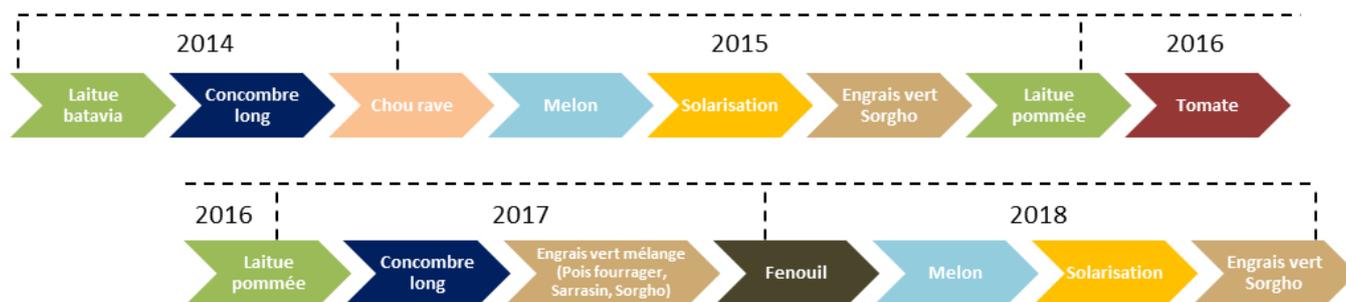


Figure 7 : Schématisation de la rotation LongAB : maraîchage diversifié en agriculture biologique destiné aux circuits longs

Afin de créer la référence LongAB sur ROTAT, les simulations ont tout d'abord consisté en la recréation de la rotation sur le logiciel. Pour cela, chaque culture a été renseignée selon ses caractéristiques exactes de dates de plantation, de fin de récolte et d'interculture durant l'expérimentation. La liste de « cultures » pour la conception de la rotation comprenait ainsi 15 lignes correspondant à chaque créneau de culture identifié ci-dessus. A l'aide des données expérimentales issues du projet 4Sysleg, l'outil a ainsi pu calculer les temps de travail et la marge brute globaux de la rotation. Ces données ont ainsi pu servir de comparaison vis-à-vis des résultats des autres simulations.

Il est donc possible de résumer la rotation LongAB par les points principaux suivants :

- Longueur de la rotation : 5 ans,
- Nombre de créneaux de cultures : 15,
- Nombre de cultures commercialisables : 10 dont 3 répétitions
- Nombre de créneaux en engrais verts : 3
- Nombre de créneaux en solarisation : 2
- Temps de travail global (h/ha/an) : 3 198
- Marge brute globale (€/ha/an) : 96 466
- Rentabilité (€/h) : 30,16

Pour les autres simulations, la liste de « cultures » a été simplifiée pour intégrer uniquement les données moyennes pour chaque type de culture présente dans LongAB. Elle comprenait ainsi les 10 lignes suivantes : chou rave, concombre long, engrais vert pois fourrager-sarrasin-sorgho, engrais vert sorgho, fenouil, laitue batavia, laitue pommée, melon, solarisation et tomate. Pour chacune de ces « cultures », les données de dates de plantation, dates de fin de récolte, besoins en azote, temps de travail et marge ont été tirées des données issues de LongAB. Lorsque cela était nécessaire, elles ont été moyennées (cas du melon ou du concombre qui reviennent plusieurs fois à la même période de l'année dans la rotation).

En complément de ces données, les délais de retours (cultures et familles) issus de la bibliographie ont été appliqués pour la simulation. Le délai d'interculture a, pour des raisons de simplicité, été fixé à 10 jours après chaque culture. Par ailleurs, la durée de rotation à produire a été fixée à 5 ans et aucune restriction n'a été posée concernant le nombre maximal de cultures dans la rotation, le nombre maximal de cultures différentes dans la rotation, le nombre maximal de cultures primaires (chou rave, concombre long, fenouil, laitue batavia, laitue pommée, melon, tomate) ou le nombre maximal de cultures secondaires (engrais vert pois fourrager-sarrasin-sorgho, engrais vert sorgho, solarisation). Enfin, les précédents et suivants autorisés ont également été fixés en fonction des informations tirées de la bibliographie : interdiction des successions cucurbitacées/solanacées, interdiction des

successions salade/salade, interdiction des successions d’engrais verts, interdiction d’une solarisation après un engrais vert.

Le facteur majeur de variation appliqué lors des simulations a ainsi été celui de la fréquence des cultures au sein d’une rotation. Dans le cadre de la présentation des résultats, trois simulations (53, 54 et 55), représentatives des résultats des simulations les plus abouties sous ROTAT, vont être étudiées. Leurs caractéristiques principales sont exposées dans le tableau ci-dessous.

Simulation n°	Critères de variation		Nombre total de rotations produites	Rotation à la marge la plus élevée				Rotation avec le plus grand nombre de cultures			
	Fréquences des cultures durant la rotation	Délais de retour (années)		Nombre de cultures	Nombre de cultures différentes	Marge (€/ha/an)	Rentabilité (€/h)	Nombre de cultures	Nombre de cultures différentes	Marge (€/ha/an)	Rentabilité (€/h)
53	Toutes cultures : 0,5 sauf EV : 0,1 Tous groupes : 1 Solarisation : 0,1	FAMILLES Solanacées : 3 Cucurbitacées : 2 CULTURES Chou rave : 3 Concombre saison : 2 Fenouil : 2 Laitue pommée : 0 Laitue batavia : 0 Melon primeur : 4 EV Sorgho : 0 EV Pois fourrager-Sarrasin-Sorgho : 0 Tomate saison : 4 Solarisation : 2	743	8	5 à 6	79 920	27,31	8	5 à 6	79 920	27,31
54	Toutes cultures : 0,5 Tous groupes : 1 Solarisation : 0,2	FAMILLES Solanacées : 3 Cucurbitacées : 2 CULTURES Chou rave : 3 Concombre saison : 2 Fenouil : 2 Laitue pommée : 0 Laitue batavia : 0 Melon primeur : 4 EV Sorgho : 2 EV Pois fourrager-Sarrasin-Sorgho : 2 Tomate saison : 4 Solarisation : 2	316 644	8	5 à 6	79 920	27,31	13	8 à 10	68 742	27,57
55	Chou rave : 0,3 Concombre saison : 0,6 Fenouil : 0,3 Laitue pommée : 0,5 Laitue batavia : 0,5 Melon primeur : 0,6 EV Sorgho : 0,5 EV Pois fourrager-Sarrasin-Sorgho : 0,5 Tomate saison : 0,5  Tous groupes : 1 Solarisation : 0,2	Idem précédent	229 011	8	5 à 6	77 920	27,34	13	10	66 742	27,61

Figure 8 : Tableau synthétique des caractéristiques des rotations à marge la plus élevée et rotations avec le plus grand nombre de cultures pour les essais de simulation 53, 54 et 55

En comparant tout d’abord les simulations du tableau les unes aux autres, il est notable que le fait de faire varier la fréquence des cultures au sein d’une rotation ainsi que le délai de retour affecte grandement le nombre de rotations produites (essai 53 à essai 54). Cela est nettement visible en regardant le cas des engrais verts : dans la simulation 53, ceux-ci sont gérés par la fréquence (fixée à 0.1, soit, sur une rotation de 5 ans, une apparition une fois tous les deux maximum), ce qui donne 743 rotation. Dans la simulation 54, on remplace la fréquence par la mise en place d’un délai de retour de 2 ans qui devrait produire un résultat similaire mais donne en réalité 316 644 rotations.

En revanche, la rotation à la marge la plus élevée ne s’en trouve pas affectée que ce soit par son nombre de cultures maximal, sa diversité de culture, sa marge ou sa rentabilité. Du côté de la rotation avec le plus grand nombre de cultures, ces modifications ont cependant un impact significatif puisque l’on passe de 8 à 13 cultures maximales tout en conservant voire en augmentant la rentabilité. De

même, le nombre de cultures différentes augmente significativement, au contraire de la marge brute qui, elle, tend à diminuer.

Dans l'objectif de faire remonter la marge, la simulation 55 a été concentrée sur l'ajustement des fréquences de cultures, culture par culture (voir ci-dessous le tableau des rentabilités par culture).

Culture	Temps de travail (h/ha)	Marge brute (€/ha)	Rentabilité (€/h)
Concombre saison	3170	99350	31,34
Chou rave	1480	32500	21,96
EV Pois fourrager-Sarrasin-Sorgho	60	-1450	-24,17
EV Sorgho	45	-730	-16,22
Fenouil	1270	28400	22,36
Laitue batavia hiver tardif	890	18400	20,67
Laitue pommée	890	18400	20,67
Melon primeur	710	49800	70,14
Solarisation	85	-1980	-23,29
Tomate saison	2490	74800	30,04

Figure 9 : Tableau de rentabilité par culture pour la liste de cultures LongAB

Cela avait pour objectif de favoriser les cultures les plus rentables en leur attribuant un niveau de fréquence plus élevé (cas du melon et du concombre). Cependant, il apparaît que cela a finalement peu d'effet en termes de chiffres car la rotation à la marge la plus élevée voit sa marge brute diminuer et le reste de ses indicateurs stagner tandis que la rotation avec le plus grand nombre de cultures subit le même sort.

Des simulations ultérieures ont consisté à augmenter encore la fréquence des cultures les plus rentables avec un résultat exactement semblable à celui de la simulation 55. Il semble ici que l'ajustement des fréquences des cultures dans la rotation n'ait plus d'effet et cela pourrait être dû au fait que l'outil se heurte aux restrictions des délais de retours qui l'empêchent de renouveler les cultures les plus rentables aussi souvent que nécessaire pour faire ré-augmenter la marge brute et la rentabilité. Il conviendrait donc par la suite de réaliser des essais en faisant varier ces critères tout en sachant que cela serait susceptible de produire des rotations non souhaitables du point de vue sanitaire.

En comparant maintenant de façon chiffrée les rotations des simulations 53, 54 et 55 à LongAB, il est possible de constater les choses suivantes :

- quelle que soit la simulation réalisée, la marge brute la plus élevée reste toujours largement inférieure à celle qui a été calculée sur la rotation réelle LongAB (96 466),
- le nombre de cultures maximal reste toujours inférieur à celui contenu par LongAB (15 cultures) même si ce dernier tend à s'approcher sur les simulations 54 et 55. Toutefois dans ces cas, il s'agit de rotations qui, malgré leur rentabilité élevée, ne sont pas celles qui dégagent le plus de marge brute,
- le nombre de cultures différentes dans les simulations peut être équivalent à celui de la rotation LongAB.

Si ces résultats ne permettent pas d'affirmer avec certitude qu'il sera possible d'atteindre la longueur et la diversité de LongAB par l'utilisation de ROTAT, ils restent néanmoins très encourageants car les simulations réalisées l'ont été avec des cultures « moyennées » qui laissent donc entrevoir la possibilité, après introduction d'un paramètre de variabilité de la date de plantation ou de la date de fin de récolte, de la conception d'une rotation plus affinée, dont l'ensemble des paramètres (marge brute, rentabilité, nombre de cultures maximal et nombre de cultures différentes) pourraient être comparables ou supérieurs à ceux de LongAB.

Outre la comparaison chiffrée de LongAB et des rotations résultant des simulations, il est possible de comparer leur composition comme sur le schéma ci-après.

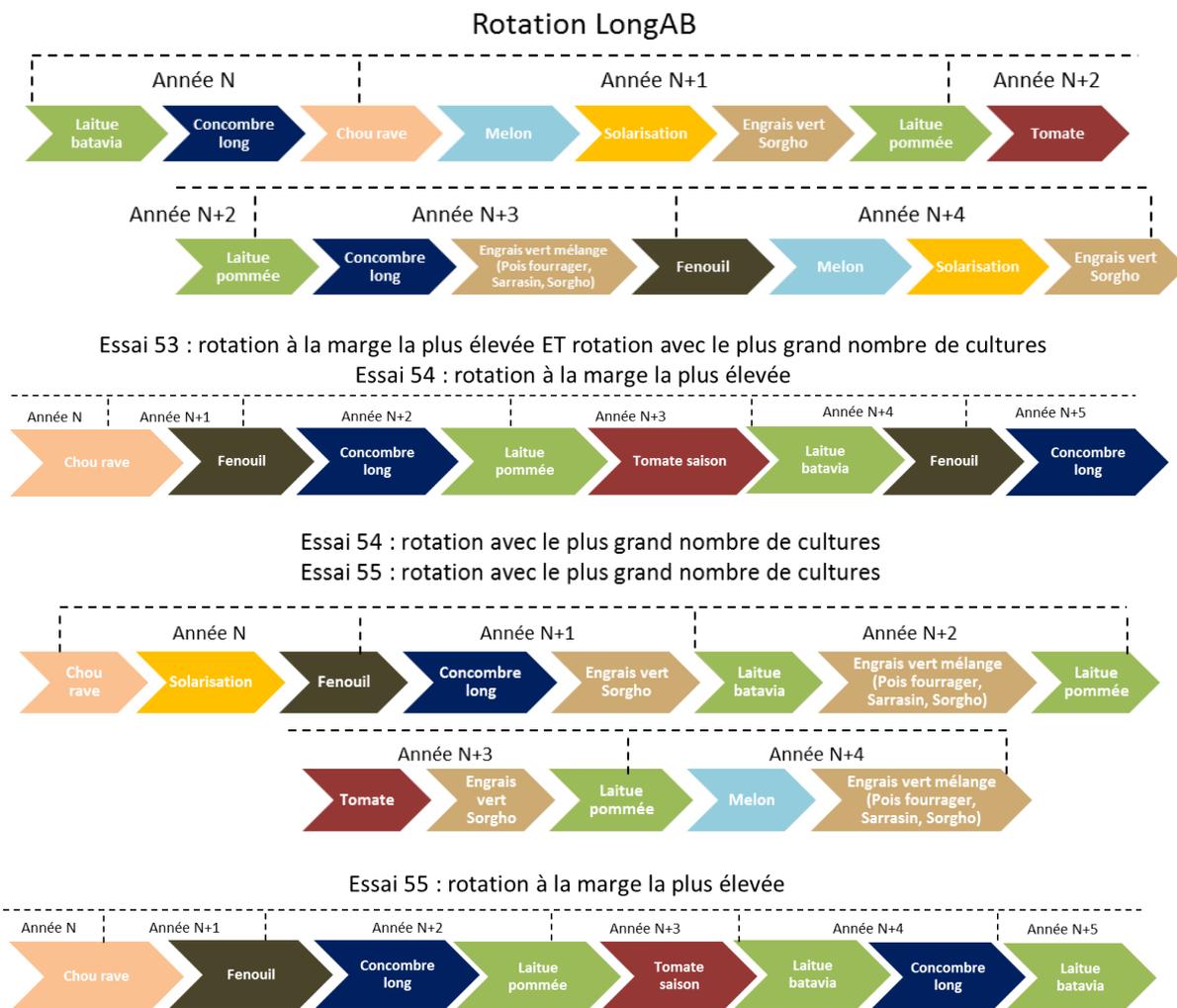


Figure 10 : Schématisation des rotations LongAB, et des rotations remarquables issues des simulations 53, 54 et 55 (rotations à la marge la plus élevée et rotation avec le plus grand nombre de cultures)

Concernant la composition de ces rotations, il est intéressant de constater que les rotations issues des simulations présentent une alternance de cultures très différente entre les rotations   marges élevées et les rotations contenant le plus de cultures. Ainsi, alors que les rotations   marges élevées sont relativement simples (alternance de chou rave, fenouil, concombre long, tomate et laitues diverses), les rotations à grand nombre de cultures incluent des cultures de type engrais vert ou solarisation qui bénéficient au système de culture mais pas à la marge brute. On retrouve finalement dans les rotations à marge élevée la tendance du secteur maraîchage à la simplification des rotations notamment dans un but d'augmentation des revenus.

La structure de rotation, longue et plus diversifiée représentée par les rotations avec le plus grand nombre de cultures, s'approche ainsi d'avantage de la rotation LongAB qui appar it finalement ici très équilibrée du point de vue de sa composition. Il semblerait donc pertinent d'étudier plus en profondeur les rotations avec le plus grand nombre de cultures afin de déterminer si des ajustements dans les dates stratégiques de cultures pourraient permettre d'atteindre une rotation telle que LongAB voire de la dépasser du point de vue de la marge brute, de la longueur ou de la rentabilité. En particulier, les engrais verts semblent presque trop présents dans ces rotations (essais 54 et 55, comprenant 4 créneaux d'engrais verts sur 13 créneaux de cultures) et pourraient peut-être être remplacés par des cultures primaires avec une légère variation de leurs dates stratégiques.

Par ailleurs, il serait intéressant d'aller plus loin dans l'étude des rotations issues des simulations en réalisant par exemple une ACP (Analyse en Composantes Principales) permettant de regrouper les rotations et éventuellement d'identifier les plus prometteuses pour les affiner. Ce travail était par ailleurs prévu dans le cadre du stage mais a dû être reporté du fait des dispositions sanitaires ayant eu cours en début d'année et du nombre de simulations (plus d'une centaine) qui ont été nécessaires avant d'arriver à un résultat probant. Cette longueur inattendue dans la prise en main de ROTAT va d'ailleurs faire l'objet d'une entrée dans le mode d'emploi de la base de données afin de rendre le passage de l'un à l'autre plus aisé et de souligner les points d'attention auxquels s'attacher.

## 6. Discussion

Par la construction de la base de données, les questionnements sur le paramétrage et la réalisation du cas d'étude LongAB sous ROTAT, le stage a permis d'apporter des réponses aux hypothèses initialement posées sous la forme de points forts mais aussi de points d'attention voire de points à améliorer.

La première hypothèse et sans doute la plus déterminante supposait que l'outil ROTAT, qui n'avait alors jamais été utilisé dans le cadre du maraîchage sous abris froids (que ce soit en France ou dans le monde) pouvait être adapté pour ce type d'agriculture et tenir compte des contraintes et spécificités inhérentes à ces systèmes de production. La réponse à la question posée peut être envisagée à deux niveaux.

Il apparaît tout d'abord que l'outil ROTAT a bien été capable de recréer la rotation référence LongAB, ce qui confirme sa capacité à prendre en compte les spécificités du maraîchage telles que la multiplicité des cultures par année, le nombre variable de cultures par année de rotation ou encore l'intégration de cultures particulières telles que les engrais verts et la solarisation. Le cas d'étude a également permis de valider la faisabilité de l'échelonnage des cultures, c'est-à-dire par exemple la gestion de cultures de type « salade d'automne » et « salade d'hiver ».

En revanche, les simulations sur le cas d'étude ont mis en évidence des faiblesses de l'outil notamment concernant la prise en compte de la variabilité des paramètres. En effet, alors que les cultures peuvent théoriquement être plantées avec un intervalle pouvant aller d'une à plusieurs semaines, le logiciel n'accepte en entrée qu'une date fixe de plantation, ce qui réduit d'autant les possibilités de génération d'une rotation intégrant l'ensemble des espèces contenues dans la simulation. Effectivement, considérant cela, il est possible que deux cultures ne puissent se suivre pour des problématiques de chevauchement qui auraient pu être évitées en ajustant la date de plantation ou la durée de culture de quelques jours seulement.

Cela est également handicapant dans le cadre de la gestion des créneaux stratégiques de plantation. Ainsi, en maraîchage, il est courant d'imaginer ses rotations en visant la production de légumes sur des créneaux précoces ou tardifs qui induisent souvent une hausse importante du prix de vente par rapport à une production en saison. Une meilleure prise en compte de la variabilité par ROTAT devrait permettre de simuler ces variations. Par défaut, celles-ci sont actuellement renseignées et conservées en base de données et l'intégration à ROTAT peut être faite via l'ajout de plusieurs cultures différentes : une culture en saison et une culture précoce par exemple avec des paramètres de date de plantation et marge variables.

Par ailleurs, l'adaptation de ROTAT au cas du maraîchage sous abris froids a dû passer par un ajustement des paramètres initialement pris en compte par l'outil. En effet, ceux-ci, bien que très pertinents dans le cadre de cultures de plein champ, ne pouvaient décrire et représenter pleinement les systèmes sous abris. En particulier, les caractéristiques de structure du sol ont été abandonnées au profit d'une meilleure description du contexte de production qui a d'ores et déjà permis une meilleure description et différenciation des cultures et de leurs paramètres en fonction de la taille de

l'exploitation dans laquelle elles se trouvent, du type d'agriculture pratiqué ou encore du circuit de commercialisation envisagé.

En complément de ces nouveaux paramètres, l'adaptation de ROTAT au contexte du maraîchage sous abris froids se poursuit à ce jour avec la mise en discussion de l'intégration de paramètres décrivant le recours aux intrants permettant de gérer la santé cultures (l'IFT, le Nodu vert et le recours aux auxiliaires). Ces paramètres devraient en effet pouvoir être définis pour chaque ligne de culture car ils ont un impact significatif sur le temps de travail et peuvent être dépendants des espèces cultivées mais aussi de l'état sanitaire des parcelles, des exigences de la filière ou encore des objectifs propres de l'agriculteur. Ainsi, il est important de contextualiser les données de temps de travail et de marge en fonction de ces paramètres pour mieux comprendre les données en sortie et leurs éventuelles variabilités.

Enfin, l'une des pratiques courantes en maraîchage est de recourir au greffage de plants afin de mieux maîtriser certains risques sanitaires. Ce paramètre devrait également pouvoir être précisé afin d'ajuster en conséquence le niveau de recours aux traitements et les délais de retour.

En conclusion, l'outil ROTAT semble pouvoir être adapté au cas du maraîchage sous abris froids mais nécessite encore un réel de travail de paramétrage et de développement afin de prendre en compte les différences de contexte de production, en lien avec la problématique de formalisation des connaissances sur les rotations, et la variabilité des données afin de permettre la génération de rotations plus réalistes vis-à-vis des possibilités de plantation notamment.

L'ajout des nouveaux paramètres tels que suggérés ci-dessus amène à la question de la disponibilité des données nécessaires pour renseigner ces paramètres pour chaque culture, question qui faisait l'objet de la deuxième hypothèse du stage.

Il s'agit là d'un véritable enjeu car, comme souligné tout au long de ce rapport, la plupart des données ont été récoltées à dire d'expert ou renseignées par le biais de données expérimentales. Ainsi, pour les cas d'étude et les cultures ayant fait l'objet d'expérimentations, les données peuvent être aisément récupérables, à la condition que les mesures adéquates aient été effectuées. Cependant cela est vrai uniquement pour ces cultures car dans le cas où elles n'ont pas fait l'objet d'expérimentations, seule la bibliographie sera à même de fournir des éléments théoriques pour le remplissage des paramètres. Or, du fait de la tendance à la spécialisation des exploitations (ou est-ce l'inverse ?), il existe une grande quantité de données sur les cultures les plus courantes (la salade, la tomate, le melon, le concombre, la courgette et la fraise) et sensiblement moins sur les autres.

D'autre part, concernant en particulier les temps de travaux, il est nécessaire d'être prudent avec les données récoltées en station expérimentale car elles peuvent être surestimées par rapport à la réalité d'un maraîcher. De même, les données de marge peuvent être assez complexes à obtenir et impliquent des hypothèses importantes sur les prix de vente, ce qui implique un travail parfois important mais aussi une possibilité de variabilité dans les données en fonction des hypothèses posées.

En ce sens, la base de données créée à l'occasion du stage représente une opportunité importante de regrouper et formaliser les données nécessaires à la conception de rotations. Il s'agit également d'un outil qui se veut vecteur de diversification par la mise en évidence de cultures peu cultivées en maraîchage mais dont l'intégration dans les rotations pourrait être un point fort tant du point de vue de la diversification de la production que du point de vue de la gestion sanitaire des parcelles.

Ces cultures inhabituelles pourraient ainsi faire l'objet d'une recherche de bibliographie et de savoir expert plus appuyée de façon à encourager les expérimentations à leur sujet et ainsi promouvoir leur insertion dans les rotations à l'échelle de la filière. La base de données et les rotations issues de son utilisation et de celle de ROTAT pourraient ainsi devenir, en plus d'un outil collaboratif de référence, un moteur de débat à différentes échelles de la filière et un appui important dans la diversification des rotations à plus large échelle.

Dans l'attente de la récolte de ces données, il reste possible de travailler sur les aspects de diversification par alternance de familles et de groupes et le respect des délais de retour associés, ce qui constitue déjà une avancée importante vis-à-vis de l'état actuel de diversification des rotations en maraîchage sous abris. En cela, la deuxième hypothèse peut donc être validée avec néanmoins des perspectives importantes d'améliorations, pour lesquelles l'outil de base de données jouera sans conteste un rôle majeur.

La troisième et la quatrième hypothèses liées à la problématique du stage supposaient d'une part que les rotations de cultures proposées par ROTAT différencieraient substantiellement des pratiques actuelles et d'autre part que les rotations issues des simulations seraient plus longues, diversifiées et économes en intrants que celles pratiquées sur terrain. A ce niveau, il est nécessaire de distinguer la comparaison avec les pratiques de référence et la comparaison avec la rotation LongAB. En effet, en termes de diversification, la rotation LongAB représente déjà un progrès vis-à-vis des rotations les plus courantes et l'un des objectifs sous-jacents à l'utilisation de ROTAT était de faciliter la construction de rotations telles que LongAB : longues et diversifiées.

Ainsi, malgré le fait que l'outil n'a pas encore abouti à des rotations aussi longues et diversifiées que la rotation LongAB, il a réussi à proposer des successions longues (jusqu'à 13 cultures en 5 ans) et comprenant une grande diversité de cultures (jusqu'à 10 cultures différentes), le tout en respectant les délais de retour des cultures et des familles, ce qui diffère substantiellement des pratiques de maraîchage les plus courantes qui, à dire d'expert, sont tout au plus longues de 3 à 4 ans et comprennent 4 à 5 cultures au maximum sans respect des délais de retour.

Pour aller plus loin, il est évidemment nécessaire et envisagé de poursuivre les simulations afin de se rapprocher voire même de dépasser la rotation LongAB en termes de longueur et de diversification. En particulier, une attention spécifique devra être portée à la durée d'interculture et à la variabilité des dates de plantation et dates de fin de récolte. Ces essais pourront notamment s'appuyer sur l'étude des rotations les plus prometteuses issues des simulations précédentes afin de trouver les moyens les plus efficaces d'augmenter le nombre et la diversité de cultures qu'elles comportent tout en augmentant si possible la rentabilité des rotations conçues et en restant dans les règles de délais de retour.

Si cela s'avérait impossible avec la liste de cultures actuelles, ce pourrait être le signe que l'intégration de nouvelles cultures aux rotations est indispensable pour la réussite du projet. Cet élément serait alors déterminant dans la sensibilisation des acteurs des filières à la nécessité de diversifier les systèmes maraîchers. Ainsi, malgré des résultats pouvant encore être améliorés, les hypothèses 3 et 4 peuvent également être validées.

Ainsi, le travail réalisé au cours du stage a permis de valider toutes les hypothèses posées à ses débuts tout en posant à son tour des questionnements décisifs pour la suite du projet dont la résolution fera l'objet de la suite et la fin du stage, en complément d'une formalisation pour une résolution ultérieure.

## 7. Conclusion

La question posée à l'initiation du stage était la suivante : « Comment adapter l'outil informatique ROTAT au maraîchage sous abris froids et le paramétrer pour concevoir des successions de cultures longues, diversifiées et économes en intrants ? »

Grâce aux divers travaux réalisés, la réponse à cette problématique a pris une forme triple :

- Par la construction d'une base de données de cultures de référence, contextualisée, fiable, collaborative et dont les sources bibliographiques sont traçables,
- Par des questionnements paramétriques approfondis dont certains sont encore à l'étude à ce jour (groupes de cultures sensibles à un bioagresseur commun),

- Par la confrontation de l'outil à un cas d'étude tiré d'une expérimentation réelle.

L'ensemble de ces éléments a permis la constitution des résultats du stage à savoir le fait que l'outil ROTAT peut être adapté et utilisé dans le cadre de la génération de rotations longues et diversifiées dans le contexte du maraîchage sous abris froids. Cependant, au-delà de ces résultats, ces éléments constituent aujourd'hui une base forte pour aller plus loin et agir dans le sens de la diversification des cultures et l'allongement des rotations en maraîchage.

Ainsi :

- La base de données a pour objectif d'être enrichie de façon collaborative et à devenir un outil de référence sur les cultures en maraîchage,
- La réflexion sur les paramètres a induit d'importantes réflexions au sujet des délais de retour en lien avec la gestion des bioagresseurs telluriques. La poursuite de ces questionnements et leur intégration à la base de données aura un rôle à jouer dans la conception de rotations de cultures diversifiées,
- La confrontation de l'outil ROTAT au cas expérimental LongAB de 4Sysleg a amené à une meilleure compréhension de l'outil, de ses points forts et de ses limites dans le contexte de la génération de rotations longues et diversifiées en maraîchage sous abris. Grâce à leur formalisation, l'utilisation de l'outil devrait devenir plus aisée et l'objectif de facilitation de la conception de rotations de cultures pourrait être atteint prochainement.

Quoi qu'il en soit le stage autour de l'outil ROTAT a permis d'ouvrir la voie pour la facilitation de la conception de successions de cultures longues et diversifiées en maraîchage sous abris froids dans le sud de la France. Le projet demande à être poursuivi mais représente un premier pas important vers l'accompagnement à la diversification dans le respect des règles agronomiques et des objectifs propres des agriculteurs et des autres acteurs de la filière. A suivre donc !

## 8. Bibliographie

- Agreste, 2012. Languedoc-Roussillon, cultures légumières. *Agreste Données*.
- Bachinger J. et Zander P., 2007. ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems. *European Journal of Agronomy*, 26:130–143.
- Brulard N., 2018. *Outils d'aide à la conception de systèmes de production maraîchers urbains optimisés pour la vente en circuits courts et de proximité*. Thèse pour l'obtention du doctorat en Génie Industriel : conception et production. Grenoble, Université Grenoble Alpes, 157 p.
- Cittadini E.D., Lubbers M., de Ridder N., van Keulen H. et Claassen G.D.H, 2008. Exploring options for farm-level strategic and tactical decision-making in fruit production systems of South Patagonia, Argentina. *Agricultural Systems*, 98(3):189–198.
- Costa A., dos Santos L.M., Alem D. et Santos R., 2011. Sustainable vegetable crop supply problem with perishable stocks. *Annals of Operations Research*, 219:265–283.
- Dogliotti S., Rossing W.A.H., van Ittersum M.K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 19, 239-250.
- Dogliotti S., Rossing W.A.H. et van Ittersum M.K., 2004. Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income : A case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 80(3):277–302.
- Dos Santos L.M., Costa A., Arenales M. et Santos R., 2010. Sustainable vegetable crop supply problem. *European Journal of Operational Research*, 204(3):639–647.
- Dury J., Schaller N., Garcia F., Reynaud A., Bergez J.E., 2012. Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review. *Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA*, 32 (2), pp.567-580.
- El-Nazer T. et McCarl B., 1986. The Choice of Crop Rotation : A Modeling Approach and Case Study. *American Journal of Agricultural Economics*, 68(1):127–136.
- GIS PIClég, 2018. *Thématiques*. Disponible sur : <https://www.picleg.fr/Nous-connaître/Thématiques>, consulté le 24/06/2020.
- Hutin C., 2016. Enquête sur les structures des exploitations agricoles. Les indicateurs caractéristiques en fruits et légumes. *Infos CTIFL*, 320, 12-16.
- Ibgui P., 2019. *Choix méthodologiques et hypothèses nécessaires pour l'évaluation économique du projet 4Sysleg (2014-2018)*. Master 1 Production, filières, territoires pour le développement durable. AgroParisTech, 60 p.
- Jeannequin B., Dosba F. et Amiot-Carlin M.J., 2005. Fruits et légumes, caractéristiques et principaux enjeux. *Un point sur les filières*.
- Lefèvre A., 2019. *Maraîchage peu diversifié en protection intégrée, conçu pour un débouché circuit long*. Disponible sur : <https://ecophytopic.fr/concevoir-son-systeme/maraichage-peu-diversifie-en-protection-integree-concu-pour-un-debouche>, consulté le : 30/06/2020.
- Lefèvre A., 2019. *DivRED : système en vente directe en protection intégrée*. Disponible sur : <https://ecophytopic.fr/concevoir-son-systeme/divred-systeme-en-vente-directe-en-protection-integree>, consulté le : 30/06/2020.
- Lefèvre A., 2019. *DivAB : système en vente directe en Agriculture biologique*. Disponible sur : <https://ecophytopic.fr/concevoir-son-systeme/divab-systeme-en-vente-directe-en-agriculture-biologique>, consulté le : 30/06/2020.

- Lefèvre A., 2019. *Maraîchage diversifié en AB, conçu pour un débouché circuit long*. Disponible sur : [https://ecophytopic.fr/concevoir-son-systeme/maraichage-diversifie-en-ab-concu-pour-un-debouch -circuit-long](https://ecophytopic.fr/concevoir-son-systeme/maraichage-diversifie-en-ab-concu-pour-un-debouché-circuit-long), consulté le : 30/06/2020.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2020. *Qu'est-ce que le NODU ?* Disponible sur : <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-nodu>, consulté le : 20/07/2020.
- Nemecek T., Hayer F., Bonnin E., Carrou e B., Schneider A. et Vivier C., 2015. Designing eco-efficient crop rotations using life cycle assessment of crop combinations. *European Journal of Agronomy*, 65:40–51.
- Pennec N., 2019. S'installer en Maraîchage biologique. Guide technique réalisé par le réseau agriculture biologique des Chambres d'agriculture. *APCA*, 60 p. [Diffusé le 22/02/2019].
- Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), 2020. *DiverIMPACTS*. Disponible sur : <https://www.diverimpacts.net/about.html> .
- Rey F., Coulombel A., Melliand M.L., Conseil M., 2015. Tome 2 : fiches techniques par légume. ITAB, *Produire des légumes biologiques*.
- Schönhart M., Schmid E. et Schneider U., 2011. CropRota - A crop rotation model to support integrated land use assessments. *European Journal of Agronomy*, 34(4):263–277.
- S gaard H.T. et Sørensen C.G., 2004. A model for optimal selection of machinery sizes within the farm machinery system. *Biosystems Engineering*, 89(1):13–28.
- Stockle C., Donatelli M. et Nelson R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18:289–307.
- Vereijken P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *Developments in Crop Science*, 25(C):293-308.