



Haute école spécialisée bernoise

Haute école des sciences agronomiques,
forestières et alimentaires

Master of Science in Life Sciences / Applied Agricultural and Forestry Sciences

Screening de légumineuses pour couverts végétaux : développement des biomasses et fixation azotée

Travail de master



Claude-Alain Gebhard

Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, HAFL,
CH-3052 Zollikofen, juillet 2012

Présenté à:

Hans Ramseier (HAFL) et Dr.Rapheël Charles (ACW)

Avec la collaboration de :



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de
l'économie DFE

**Station de recherche
Agroscope Changins-Wädenswil ACW**



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Déclaration sur la propriété intellectuelle

Par ma signature, je déclare:

- connaître le «Code de déontologie de la HESA en matière d'utilisation des sources d'information», ainsi que les conséquences de son non-respect;
- m'y être conformé-e lors de la réalisation de ce travail;
- avoir réalisé ce travail personnellement et de manière autonome.

Lieu, date

Signature

Préface et remerciements

Ce travail de Master est une petite partie d'un projet de recherche en cours dans le cadre de la recherche agronomique Suisse qui a pour but d'améliorer les couverts végétaux. Je remercie l'Office Fédéral de l'Agriculture qui a soutenu financièrement cette étude.

La possibilité de prendre part à ce projet a été pour moi l'occasion de poser le pied dans la recherche appliquée. C'est une expérience très enrichissante et structurante. C'est aussi la chance de m'intégrer dans un travail d'équipe, de développer mes capacités de travail en réseaux et d'apprendre à mettre en commun les compétences et les moyens.

Je veux remercier toutes les personnes qui m'ont fait confiance, ont patiemment soutenu mes efforts et dirigé mes pas sur ce nouveau terrain, en tout particulier mes conseillers scientifiques: Hans Ramseier et la Dr. Sabine Gusewell à Zollikofen ainsi que le Dr. Raphaël Charles à Nyon et toute son équipe, en particulier Laurent Deladoey et la Dr. Lucie Büchi.

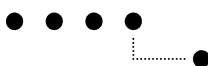
Je remercie encore Agroscope Changins-Wädenswil qui a accepté de me recevoir pour ce travail ainsi que l'équipe du laboratoire Sol-conseil à Nyon. Je suis aussi très reconnaissant à l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich avec qui la collaboration scientifique a été harmonieuse grâce à l'appui du Dr Frank Liebisch et de toute l'équipe de l'Isolab.

Enfin, c'est avec une grande reconnaissance que je remercie toutes les bonnes volontés et les petites mains qui de près ou de loin ont accepté de m'aider à mettre en place les expérimentations, à collecter mes données et à les mettre en valeur.



Table des matières

<i>Déclaration sur la propriété intellectuelle</i>	2
<i>Préface et remerciements</i>	2
<i>Table des matières</i>	3
<i>Liste des tableaux</i>	5
<i>Listes des figures</i>	6
<i>Liste des annexes</i>	7
<i>Liste des annexes électroniques</i>	8
<i>Liste des abréviations</i>	9
<i>Résumé</i>	10
<i>Summary</i>	11
1 Introduction et définition du problème	12
1.1 Un double constat	12
1.2 Un nouveau projet de recherche agronomique	13
1.3 Screening d'espèces, screening de légumineuses	14
1.4 Questions de recherches	14
2 Etat de la recherche	15
2.1 La fixation biologique de l'azote par les légumineuses	15
2.1.1 Potentiel et limites de la FBA	16
2.1.2 Transfert de l'azote fixé	18
2.1.3 Quantification des transferts	19
2.2 Couverts végétaux et engrais verts	21
2.2.1 Bénéfices et risques des couverts végétaux	21
2.2.2 Améliorer les engrais verts avec des légumineuses	22
2.2.3 Définitions	23
3 Matériels et méthodes	24
3.1 Choix des espèces de légumineuses	24
3.2 Trente procédés retenus, choix des densités de semis	24
3.3 Double expérimentation en plein champ	27
3.4 Valeur agronomique : observations et récolte des données	28
3.4.1 Analyses chimiques des biomasses	30
3.4.2 Analyses de sol	32
3.5 Détermination de la dynamique de croissance des espèces	32
3.6 Méthode de l'Abondance Naturelle de l'isotope N ¹⁵ , choix de 2 espèces de référence	33



3.6.1	Valeur Beta et correction de concentration azotée	34
3.6.2	Détermination des valeurs Beta	35
3.6.3	Analyses isotopiques de N ¹⁵	36
3.7	Limites de la méthode NA	37
3.8	Analyses statistiques	37
4	Résultats et discussion	38
4.1	Données pédologiques	38
4.2	Données météo	39
4.3	Rendement en biomasse des plantes testées	39
4.3.1	Biomasse brute et biomasse nette	39
4.4	Dynamique de croissance des espèces	45
4.4.1	Vitesse de couverture du sol et pouvoir de concurrence contre les adventices	49
4.4.2	Capacité de concurrence des plantes testées vis-à-vis des plantes accompagnatrices	50
4.4.3	Rendement des biomasses en mélange, expérimentation de Changins en 2010	53
4.5	Effet de concurrence des plantes testées vis-à-vis des adventices	54
4.5.1	Développement spatial des biomasses	57
4.6	Azote total contenu dans la biomasse aérienne	58
4.7	Azote biologiquement fixé	61
4.7.1	Valeurs Beta des 22 espèces retenues	61
4.7.2	Quantité d'azote dérivé de l'atmosphère	62
4.8	Quantités de nutriments principaux dans les biomasses	65
4.8.1	Phosphore (P)	66
4.8.2	Potassium (K)	67
4.8.3	Calcium (Ca)	68
4.8.4	Magnésium (Mg)	69
4.9	Taux de destruction par le gel :	70
4.9.1	Légumineuses vivantes au printemps	71
4.9.2	Adventices vivantes au printemps	72
4.9.3	Couverture du sol au printemps par les résidus	74
4.10	Observation de la pénétration des socs lors du semis direct	75
5	Conclusions	76
6	Bibliographie:	79
7	Annexes	81



Liste des tableaux

Tableau 1: Quantités d'azote atmosphérique fixé par quelques légumineuses à graines,.....	17
Tableau 2: Liste des espèces par No de procédés	25
Tableau 3: Densités de semis et adaptation 2010 et 2011	26
Tableau 4: Liste des espèces analysées	31
Tableau 5: Données pédologiques des 3 sites d'expérimentations	38
Tableau 6: Nmin azote utilisable en kg N/ha	38
Tableau 7: Données météo du 1 ^{er} juillet au 15 novembre.....	39
Tableau 8: Analyse du rendement de biomasse brute (kg MS/ha) des 3 essais.....	40
Tableau 9: Moyennes des rendements en matière sèche brute	42
Tableau 10: Moyenne des rendements: matière sèche nette (q/ha)	44
Tableau 11: Nombre de jours pour atteindre 50 % de couverture du sol par les plantes testées.....	47
Tableau 12: Nombre de jours pour atteindre 75 % de couverture du sol par les plantes testées.....	48
Tableau 13: Proportion de légumineuses à la récolte dans les mélanges avec avoine (%)	51
Tableau 14: Proportion de légumineuses à la récolte dans les mélanges avec phacélie(%).....	52
Tableau 15: Biomasse des adventices (q.MS/ha).....	55
Tableau 16: Quantité d'azote total moyenne dans la biomasse aérienne des plantes testées.....	59
Tableau 17: Teneur en Nmin.(kg/ha) des parcelles Fèverole et Phacélie en 2011	60
Tableau 18: Valeurs Beta (moyennes de 3 répétitions).....	61
Tableau 19: Pourcent d'azote dérivé de l'atmosphère par les plantes testées.	63
Tableau 20: Quantité d'azote dérivé de l'atmosphère.....	64
Tableau 21: Quantités moyennes de Phosphore dans la biomasse aérienne (kg P/ha)	66
Tableau 22: Quantités moyennes de Potassium dans la biomasse aérienne (kg K/ha).....	67
Tableau 23: Quantités moyennes de Calcium dans la biomasse aérienne (kg Ca/ha)	68
Tableau 24: Quantités moyennes de Magnésium dans la biomasse aérienne (kg Mg/ha)	69
Tableau 25: Couverture du sol par les plantes testées à la reprise de végétation (%)	71
Tableau 26: Couverture du sol par les adventices à la reprise de végétation (%).....	73
Tableau 27: Couverture du sol par les résidus à la sortie de l'hiver (%).....	74



Listes des figures

Figure 1: Nodules bien visibles sur une racine de fève (Vicia faba), photo C-A Gebhard.....	16
Figure 2: Plan du dispositif expérimental	27
Figure 3: Semis à Zollikofen	28
Figure 4: Récolte de l'essai à Zollikofen	30
Figure 5: Schéma de la méthode de l'Abondance Naturelle	34
Figure 6: Moulin à billes Retsch et confection des « boulettes ».....	36
Figure 7: Biomasse brute moyenne (q.MS/ha) récoltée dans les 3 essais, test de Duncan.....	40
Figure 8: Courbes de croissances pour la gesse cultivée, Changins 2011	45
Figure 9: Nombre de jours nécessaires pour 50 et 75 % de couverture à Changins en 2010	46
Figure 10: Corrélation entre vitesse de couverture et pouvoir de concurrence des adventices.....	49
Figure 11: Rendement moyen du mélange des plantes testées avec l'avoine (%).....	53
Figure 12: Rendement moyen du mélange des plantes testées avec la phacélie (%)	54
Figure 13: Corrélation entre la quantité de biomasse récoltée et la proportion d'adventices	56
Figure 14: Des hauteurs très différentes	57
Figure 15: Hauteur moyenne des plantes testées à la récolte (moyennes de 3 essais).....	58
Figure 16: Biomasse produite par ha et quantité totale d'azote de quelques espèces.....	60
Figure 17: Températures hivernales minimale durant les 2 hivers d'expérimentation.....	70



Liste des annexes

Annexe 1: Définition du projet de travail de master.....	81
Annexe 2: Calcul de quantité d'azote pour un pot expérimental estimé à 10 litres de sol.....	82
Annexe 3: Expérimentation « Valeurs Beta »	83
Annexe 4: Couverture du sol par les plantes testées à 45 et 90 jours	86
Annexe 5: Graphiques de corrélations % adventices et vitesse de couverture et corrélation entre % adventices à la récolte et temps nécessaire à 50 % de couverture	87
Annexe 6: Les engrais azotés industriels.....	89
Annexe 7: Classeur séparé des relevés au champ	92



Liste des annexes électroniques

- I. Relevés expérimentations
- II. Analyses de sol, Sol-conseil
- III. Analyses de biomasses, Sol-Conseil
- IV. Analyses N15, Isolab
- V. Calcul Valeurs-Beta et tableau
- VI. Calculs %Ndfa
- VII. Analyses de variances et Duncan : Script R Rstart pour BarplotDuncanamélioré, Script R Duncan_aov MSbrut et données D1011CZMSbrutmultisite, Script R Duncan_aov MSnet et données D1011CZMSnetmultisite
- VIII. Script.R Gomp.dynamique de croissance et données...., courbes de dynamiques de croissance, Script R Gomp Changins 2010 et données Gomp Changins 2010, Script R Gomp Changins 2011 et données Gomp Changins 2011, Script R Gomp Zhib 2011 et données Gomp Zhib 2011, Script R Gomp VAT 2011 et données Gomp VAT 2011
- IX. Script R ScriptData_multisites_all_new et données Données multisites_MS_NPKCaMg_allnew
- X. Script R Script Proleg et données DPropor.leg
- XI. Script R Correl%adv%couv et données Dgompertzmultisitesbis
- XII. Script R Couv.Sortie.Hiver et données Dcouv.sortie.hiver



Liste des abréviations

%Ndfa	Percent Nitrogen derived from atmosphere = Pourcent d'azote dérivé de l'atmosphère
ACW	Agroscope Changins-Wädenswil
ART	Agroscope Reckenholz-Tänikon
B-value	Valeur B ou "valeur Beta" = la valeur référence de delta N ¹⁵ à 100% de fixation symbiotique
FBA	Fixation biologique de l'azote
GJ	Gigajoules (10 ⁹ joules)
HAFL	Hochschule für Agrar, Forst und Lebensmittelwissenschaften
HESA	Haute Ecole Suisse d'Agronomie
J	Joule
M O	matière organique
MJ	megajoules (10 ⁶ joules)
NA	Natural Abundance method = méthode de l'abondance naturelle de l'isotope lourd N ¹⁵
Nmin.	Azote minéralisé
PER	Prestations Ecologiques Requises
PJ	Petajoules (10 ¹⁵ joules)
SD	Semis Direct
TCS	Technique Culturelle Simplifiée



Résumé

Cette étude a testé 25 espèces de légumineuses comme couverts végétaux en expérimentation de plein champ sur deux ans. Elle a permis de caractériser agronomiquement ces espèces quant à leurs aptitudes à être utilisées comme partenaires dans des couverts végétaux en cultures associées dans le but d'améliorer les services agro-écologiques de ces derniers.

La capacité de concurrence des espèces vis-à-vis des adventices a été étudiée. La quantité de biomasse aérienne formée par les espèces testées a été mesurée entre 0.4 et 5.9 tonnes de matière sèche par hectare. La vitesse d'implantation des espèces a été très variable : de 18 à 43 jours pour atteindre 50 % de couverture du sol. Une estimation de l'influence de ces deux paramètres sur la capacité de compétition des espèces a été faite : dans les conditions de nos essais, la capacité de concurrence des espèces est globalement influencée à 58% par la quantité de biomasse aérienne et à 36 % par leur vitesse d'implantation.

La capacité de concurrence des espèces a aussi pu être testée dans des mélanges expérimentaux avec la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) et l'avoine de printemps (*Avena sativa*) utilisées comme plantes accompagnatrices. Indépendamment du partenaire utilisé, 6 espèces ont atteint plus de 50 % de la biomasse totale des mélanges: *Pisum sativum*, *Vicia sativa*, *Vicia villosa*, *Vicia faba*, *Lathyrus sativus* et *Lupinus albus*.

A l'aide de la méthode de l'abondance naturelle de l'isotope N¹⁵, il a été possible d'estimer les quantités d'azote biologiquement fixé durant les 3 mois de végétation au champ. Pour cela, les « valeurs Beta » ont été déterminées spécifiquement pour 22 espèces dans une expérimentation en serre. Parmi celles-ci, 10 ont fixé des quantités estimées à plus de 50 kg/ha d'azote dans leur biomasse aérienne (ce qui correspond à 79% Ndfa en moyenne). Les 5 espèces les plus performantes (*Pisum sativum*, *Lathyrus sativus*, *Vicia sativa*, *Vicia faba* et *Vicia villosa*) ont fixé des quantités estimées entre 109 et 149 kg/ha d'azote, ce qui représente en moyenne 81% Ndfa.

Sur la base des différents paramètres étudiés les 5 espèces qui apparaissent comme les plus avantageuses en termes de concurrence contre les adventices et de fixation biologique de l'azote pour être utilisées dans des couverts végétaux en culture associées sont : la vesce cultivée (*Vicia sativa*), la fèverole (*Vicia faba*), le pois (*Pisum sativum*) la gesse cultivée (*Lathyrus sativus*) et la lentille (*Lens culinaris*).

La présence dans nos expérimentations de deux variétés de pois et de lentilles a démontré que le comportement variétal peut varier significativement. Ceci nous amène à conclure que de nouvelles expérimentations incluant différents cultivars des espèces les plus prometteuses devraient être menées. Il serait ainsi possible de renforcer le développement de couverts végétaux mixtes, bien adaptés aux différents services attendus dans le cadre d'une approche globale des systèmes culturaux.

Mots clés: légumineuses, couverts végétaux, cultures associées, contrôle adventices, fixation biologique de l'azote.



Summary

This two year study tested 25 legumes species as cover crops in field experiments. It allowed an agronomical characterization of the abilities of these species as partners in mixed cover crops with the aim of improving their agro-environmental services.

The weed control ability of the species was analyzed. Results showed that the above-ground biomass of the tested species measured between 0.4 and 5.9 tons dry matter/ha. The coverage speed of the species was highly variable, ranging from 18 to 43 days in order to reach 50 % of soil coverage. An estimation of the influence of these two parameters on the weed control ability of the species could be determined. Under the conditions of the experiments, weed control capacity of the species was influenced 58% by the amount of the areal biomass and 36% by the coverage speed.

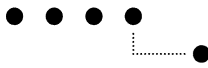
In two experimental mixtures with phacelia (*Phacelia tanacetiflora*) and spring oat (*Avena sativa*) as companion plants, the competition ability of the legumes could also be tested. Regardless of the companion plant, 6 species reached more than 50 % of the total biomass: *Pisum sativum*, *Vicia sativa*, *Vicia villosa*, *Vicia faba*, *Lathyrus sativus* and *Lupinus albus*.

Using the “N15 Natural Abundance Method”, it was possible to determine the quantities of nitrogen fixed from the atmosphere during the 3 month long field experiments. The “B-values” were specifically defined for 22 species in a greenhouse experiment. Of the 22 species, 10 fixed more than 50 kg N/ha from the atmosphere, corresponding to an average of 79% Ndfa. The 5 best species (*Pisum sativum*, *Lathyrus sativus*, *Vicia sativa*, *Vicia faba* and *Vicia villosa*) fixed amounts estimated between 109 and 149 kg N/ha from the atmosphere, corresponding to 81% Ndfa.

Based on the different parameters studied, five species appear to be most advantageous in terms of weed control and nitrogen fixation in associated cover-crops and include: common vetch (*Vicia sativa*), horse bean (*Vicia faba*), common pea (*Pisum sativum*), grass pea (*Lathyrus sativus*) and lentil (*Lens culinaris*).

The two lentil and pea cultivars used in the field trials demonstrated significantly variable behavior. This observation suggests that other experiments including different varieties of the more promising species should be conducted. It would then be possible to strengthen the development of mixed cover crops within a global cropping systems approach better adapted to the expected agro-environmental services.

Keywords: legumes, cover-crops, mixed-crops, weed control, biological nitrogen fixation.



1 Introduction et définition du problème

Ce travail de master étudie par une démarche expérimentale le comportement agronomique de 25 espèces de légumineuses et procède à une évaluation des quantités d'azote biologiquement fixées en plein champ. Préalablement une recherche bibliographique relativement extensive introduit la problématique des légumineuses dans l'agriculture.

Le rôle bénéfique des légumineuses dans l'acquisition et le maintien de la fertilité des sols et des systèmes culturaux agricoles est connu depuis l'antiquité, ainsi que la pratique traditionnelle des cultures associées et des engrais verts à base de légumineuses. Pourtant depuis la découverte au 20^{ème} siècle du procédé industriel permettant de fixer industriellement l'azote atmosphérique nommé procédé Haber-Bosch (Annexe 6), les pratiques traditionnelles incluant les légumineuses pour la fixation biologique de l'azote ont fortement diminué au profit de l'utilisation des engrais azotés chimiques.

1.1 Un double constat

En Suisse, l'Ordonnance fédérale sur les paiements directs, introduite dès 1993, incite fortement les agriculteurs à mettre en place des couverts végétaux dans le but de préserver la fertilité des sols. Cette pratique a aussi été adoptée récemment par plusieurs pays européens. En Suisse, la mise en place de ces couverts végétaux est bien utilisée par les agriculteurs car elle est devenue obligatoire pour l'obtention des paiements directs depuis l'introduction du programme de Prestations Ecologiques Requises (PER) en 1998. Pourtant, le constat reste souvent décevant: on observe des semis clairs et tardifs, essentiellement en culture pure de phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) ou de moutarde (*Sinapsis arvensis*). Selon des observations personnelles faites ces dernières années à l'écoute des agriculteurs en Suisse, mais aussi en France et en Allemagne, la mise en place de ces couverts végétaux est souvent simplifiée, pour plusieurs raisons :

- éviter des coûts supplémentaires: quantité de semences sous dosée, et travail de mise en place minimum,
- crainte de l'encombrement par la biomasse résiduelle qui complique la mise en place de la culture suivante : le labour est plus difficile et les résidus de couvert provoquent parfois une « faim d'azote »,
- risque de « salir » les parcelles avec le développement des adventices,
- ignorance des bénéfices d'une bonne pratique des couverts végétaux,
- il s'agit simplement de répondre à une exigence légale...

Sur le plan scientifique, le constat fait en Suisse par plusieurs chercheurs confirme globalement les craintes des agriculteurs quant aux risques de « salissement » des parcelles et aux situations de « faim d'azote » (Vullioud et Mercier 2004; Vullioud et al. 2006). Dans un essai de longue durée sur plus de trente ans qui compare le labour au non labour associé avec la pratique des couverts végétaux, les auteurs mettent notamment en évidence les deux points négatifs suivant :

1. Le stock grainier des adventices augmente fortement (presque un doublement) avec le non labour associé aux couverts végétaux.



2. La pratique des couverts végétaux, essentiellement à base de moutarde (*Sinapsis arvensis*), associée au non labour induit une « faim d'azote » sur la culture suivante, liée à la mobilisation de l'azote par la dégradation des pailles et de la biomasse des couverts végétaux.

Mais il relève aussi les deux points positifs suivant :

1. Le non labour associé aux couverts végétaux diminue fortement les risques d'érosion des sols par rapport au labour.
2. Il permet aussi de stabiliser le taux de matière organique (MO) dans l'horizon A des sols et par là d'augmenter leur porosité naturelle et leur pouvoir de rétention en eau.

1.2 Un nouveau projet de recherche agronomique

Face à ce constat, il est certainement possible d'augmenter l'efficacité des engrais verts car peu de recherche scientifique n'a été investie jusqu'à présent dans ce secteur. Pour combler les craintes des agriculteurs, il s'agit de développer des couverts végétaux plus efficaces permettant d'éviter la prolifération et la mise à graine des adventices sans provoquer d'immobilisation d'azote.

Pour répondre à cette double exigence, un nouveau projet de recherche a été récemment défini et entrepris au sein de la recherche agronomique suisse à Agroscope Changins-Wädenswil (ACW), CH-1261 Nyon. Ce projet est intitulé « **Nouvelles perspectives avec les couverts végétaux dans les techniques de conservation du sol** ».

Le but principal de ce projet est de développer des couverts végétaux susceptibles d'offrir une palette de services adaptés aux différents systèmes culturaux. Composés de plusieurs espèces, en culture associée, ces couverts végétaux doivent former une biomasse couvrant rapidement et efficacement le sol pour lutter contre les adventices. Cette biomasse importante permet aussi de favoriser la conservation de la matière organique du sol. En incluant des légumineuses dans ces mélanges, à l'instar des prairies artificielles, il est possible de profiter de la fixation biologique de l'azote (FBA) pour soutenir la formation de biomasse du couvert végétal mais aussi pour diminuer les phénomènes de blocages de l'azote souvent constatés dans la culture suivante. Accessoirement ces futurs couverts végétaux doivent aussi être suffisamment sensibles au gel pour permettre l'utilisation des techniques culturales simplifiées (TCS) et du semis direct (SD), sans utilisation massive de glyphosate.

Ce projet de recherche agronomique s'articule sur 3 axes principaux :

1. Caractériser les espèces végétales utilisables en couverture de sol dans notre climat: capacité à former de la biomasse, vitesse de croissance, capacité à recycler les éléments nutritifs, capacité de fixation de l'azote atmosphérique pour les légumineuses, sensibilité au gel, capacité à être intégrés dans des mélanges d'espèces utilisables avec des itinéraires culturaux de type TCS et SD (résidus de récoltes)
2. Comprendre le fonctionnement des associations plausibles et/ou possibles par modélisation de leur dynamique de croissance
3. Tester et proposer aux semenciers et aux agriculteurs les meilleures associations possibles en fonction des objectifs recherchés et des itinéraires culturaux choisis.



1.3 Screening d'espèces, screening de légumineuses

Afin de compléter le premier axe de ce projet de recherche, des screening d'espèces végétales, en expérimentation de plein champ, ont été entrepris dès 2009 par ACW. Dans cette même ligne, ce travail de master est une des étapes de ce premier axe de projet. Il consiste plus particulièrement à réaliser un **screening de légumineuses** qui serviront de partenaires aux couverts végétaux en cultures associées.

1.4 Questions de recherches

Pour pouvoir répondre aux objectifs de ce screening de légumineuses, les différentes questions de recherches sont formulées comme suit :

1. Certaines légumineuses ou groupes de légumineuses présentent elles de meilleures aptitudes que d'autres quant à leurs capacités de créer de la biomasse et, par là, à concurrencer les adventices ?
2. Quelle est leur pouvoir de concurrence dans un mélange expérimental avec l'avoine ou la phacélie, quelle sont leurs aptitudes à être associées ?
3. Certaines légumineuses ou groupes de légumineuses présentent elles des meilleures capacités à fixer de l'azote atmosphérique et si oui combien d'azote peuvent-elles mettre à disposition de la culture suivante ?
4. Certaines légumineuses ou groupes de légumineuses permettent elles une meilleure utilisation des techniques culturales simplifiées et du semis direct l'année suivante ?



2 Etat de la recherche

Les premiers chasseurs-cueilleurs, devenus sédentaires et agriculteurs, ont progressivement commencé à cultiver et à sélectionner des plantes sauvages pour se nourrir: des céréales mais aussi des légumineuses et d'autres plantes. Cette profonde et lente mutation a eu lieu en Europe probablement depuis la fin du néolithique. Les pois chiches (*Cicer arietinum*), les lentilles (*Lens culinaris*) ainsi que les fèves (*Vicia faba*) ont produit dès lors l'essentiel de la nourriture protéique végétale. Elles ont aussi permis d'améliorer la fertilité des sols. En plus de leurs qualités nutritionnelles essentielles (acides aminés), les propriétés bénéfiques des légumineuses, liée à l'amélioration de la fertilité du sol ont été reconnues empiriquement par les premiers cultivateurs. Elles sont relatées par plusieurs observateurs érudits, notamment par Theophraste (370-285 BC) (Danso, 1995), Pline l'Ancien (23-79) et Ibn Al Awwam (1200) (Pointereau, 2001).

La culture des légumineuses en rotation avec les céréales et d'autres espèces est alors devenue l'élément clé de l'autonomie de nombreux systèmes culturaux partout dans le monde en assurant naturellement aux sols et aux cultures le précieux approvisionnement en azote assimilable. Ce n'est que dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle que l'importance des légumineuses a fortement diminué avec l'arrivée des engrais azotés (Peoples et al. 1995).

2.1 La fixation biologique de l'azote par les légumineuses

L'azote atmosphérique N₂ est inerte et comme tel, il n'est pas assimilable par les plantes. Plusieurs phénomènes naturels permettent de transformer ce di-nitrogène atmosphérique en azote assimilable pour les végétaux. On appelle ce phénomène la « Fixation Biologique de l'Azote » (FBA) (Danso 1995).

Les légumineuses, comprennent plus de 18'000 espèces dont quelques centaines sont cultivables. Cette famille botanique dispose de la remarquable faculté de fixer le di-nitrogène atmosphérique directement dans le sol et de le rendre assimilable pour la nutrition végétale. Ce phénomène a lieu grâce à une symbiose très particulière entre les légumineuses et les bactéries de la famille *Rhizobia*. La compréhension et la description de cette symbiose a été faite en Europe dans les années 1880 déjà par les travaux parallèles de Hellriegel et de Beijerinck (Herrige op. 2008). L'activité fixatrice d'azote de l'association légumineuses/*Rhizobia* est le plus grand contributeur de la FBA dans les systèmes agricoles (Danso 1995).

Les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote colonisent les racines de la légumineuse à la surface desquelles elles forment des nodules (Figure 1). La transformation de l'azote atmosphérique en ammoniacque (NH₃) a lieu dans ces nodules grâce à une biochimie très complexe (Campbell et Reece 2007). Les bactéries échangent alors avec la plantes de l'azote fixé contre des sucres issus de la photosynthèse.



Figure 1: Nodules bien visibles sur une racine de fève (Vicia faba), photo C-A Gebhard

L'azote sous forme gazeuse compose près de 78 % de la troposphère. Cette immense abondance à l'échelle de la planète permet de considérer l'azote comme une ressource renouvelable d'azote pour les plantes et les cultures, comme suggéré par Bohlool et al. (1992) cité par Beschow et al. (2000).

2.1.1 Potentiel et limites de la FBA

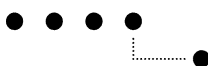
2.1.1.1 Quantification des quantités fixées

Des estimations très variées et controversées existent quant à la quantité globale d'azote fixé annuellement.

Danso (1995), cite plusieurs sources variant entre 35 et 500 millions de tonnes d'azote fixé chaque année. Selon Cleveland et al. (1999) cité par Beschow et al. (2000) dans sa revue des bénéfices potentiels de la FBA, la fixation d'azote atmosphérique terrestre globale se situerait entre 100 et 290 millions de tonnes de N par année. Ces énormes variations sont dues au fait que plusieurs phénomènes encore mal connus contribuent parallèlement à la FBA globale. Les autres phénomènes naturels participant à la FBA globale sont : la biochimie des océans, certaines autres bactéries du sol libres comme azotobacter ou formant d'autres symbioses comme les actinobactéries et les cyanobactéries, le volcanisme, la combustion de biomasse d'origine naturelle ou humaine, les éclairs électriques des orages (Campbell et Reece 2007). Il faut admettre que le montant global n'est pas connu avec précision, ni la proportion exacte des différents contributeurs à la FBA dans son ensemble. La FBA par la symbiose des légumineuses avec les *rhizobia* est considérée comme étant la plus importante Beschow et al. (2000)

En revanche plusieurs auteurs tentent de préciser la quantité d'azote fixé par les légumineuses et les *Rhizobia*. Galloway et al. (1995) ainsi que Jenkinson (2001) cités par Jensen et al. (2003) estiment quant à eux que 40 à 48 millions de tonnes de N sont fixées annuellement par les cultures de légumineuses de plein champ, mais les arbres légumineux et les prairies à légumineuses ne sont pas compris dans cette estimation.

Citant Smil (1999, 2001) et Erisman et al. (2008), Dawson (2011) estime que la fixation biologique de l'azote par les légumineuses contribue pour 50 % aux besoins alimentaires globaux, les autres 50 % devant être assurés par les engrais azotés industriels.



Pour comparaison, la synthèse industrielle de l'ammoniaque, le procédé Haber-Bosch, permettant de fabriquer les engrais azotés, fixe environ 83 millions de tonnes de N par année selon Jenkinson (2000), cité par Beschow et al. (2000). Cet ordre de grandeur est confirmé par Dawson (2011) qui mentionne 85 millions de tonnes en 2000.

Cette proportion est assez proche et cohérente avec d'autres estimations antérieures qui indiquent que la FBA (légumineuses) apportait alors annuellement plus d'azote aux plantes que le total de l'azote fixé industriellement : en moyenne c'était alors 50 à 60 % de l'azote pour les légumineuses à graine, 55 à 60 % pour les arbres légumineux et 70 à 89 % pour de l'azote accumulé par les prairies (Danso 1995). Cet auteur rejoint par Pointereau (2001) estime aussi que la part de la fixation d'azote par les légumineuses peut être encore augmentée en élargissant les surfaces cultivées avec des légumineuses qui ont fortement régressé dans les systèmes de production intensifs durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Pointereau (2001) cite une régression de l'ordre de 50% en France durant cette période. Pourtant, il relève aussi que les légumineuses à graine appauvrissent le sol car elles contiennent une forte proportion d'azote qui est exporté avec la récolte.

Les légumineuses à graines cultivées peuvent fixer de 0 à 450 kg d'azote par ha et par année, avec pourtant une quantité maximale usuelle variant entre 100 et 200 kg pour la plupart des espèces. Les résultats d'expérimentation de plusieurs auteurs, adaptés de Peoples et al. (1995) sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1: Quantités d'azote atmosphérique fixé par quelques légumineuses à graines,

Espèces	Quantités d'azote pouvant être fixées (kg/ha)
Pois chiche (<i>Cicer arietinum</i>)	3 - 141
Lentille (<i>Lens culinaris</i>)	10 - 192
Pois (<i>Pisum sativum</i>)	17 - 244
Fèverolle (<i>Vicia faba</i>)	53 - 330
Lupin (<i>Lupinus angustifolius</i>)	32 - 288
Soja (<i>Glycine max</i>)	0 - 450
Haricots (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	0 - 125
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i>)	37 - 206

Les quantités d'azote fixées par les légumineuses fourragères sont globalement du même ordre de grandeur. Elles sont plus difficiles à déterminer car elles varient en fonction de plusieurs paramètres, notamment l'âge du peuplement (qui souvent dure plusieurs années), mais aussi le moment de la coupe. Ainsi la culture de légumineuses peut contribuer à diminuer de manière importante la consommation d'engrais azotés de synthèse (Brehmer et al. 2008).

2.1.1.2 Coût et limite de la fixation biologique

La FBA globale est une immense usine naturelle mais depuis le début du 20^{ème} siècle, l'homme apporte un complément industriel à ce processus. La synthèse industrielle de l'ammoniaque (procédé Haber-Bosch) consomme une grande quantité d'énergie. Pour autant il serait tentant de croire que la fixation biologique de l'azote par les légumineuses soit



pratiquement gratuite (Peoples et al. 1995 ; Jensen et Hauggaard-Nielsen 2003 ; Crews et Peoples 2004).

Pourtant la FBA a aussi un coût car la symbiose est un échange de sucres photosynthétiques de la plante légumineuse contre de l'azote fixé par les bactéries *Rhizobia*. Le coût énergétique au niveau de la réaction biochimique métabolique des *Rhizobia* lors de la fixation de l'azote atmosphérique induit une diminution de rendement de la culture de légumineuses. Cette diminution de rendement de la culture au profit des bactéries fixatrices d'azote montre que, sur le plan de l'efficacité énergétique (énergie solaire via la photosynthèse), la fixation biologique naturelle de l'azote est en fait, légèrement moins efficace que la fixation industrielle moderne (énergie fossile), comme le démontre une récente analyse de cycle de vie (Brehmer et al. 2008).

Les mêmes auteurs montrent que cette diminution de rendement affecte aussi l'efficacité de l'utilisation du sol et donc du rendement de l'énergie solaire: «le bénéfice des légumineuses est à rechercher là où le sol n'est pas un facteur limitant». Cette éventualité n'est évidemment pas réaliste car les surfaces arables diminuent constamment et peinent à satisfaire la demande actuelle en produits agricoles. Mais encore: «le bénéfice de la fixation biologique de l'azote doit donc être soigneusement attesté et utilisé au mieux dans le secteur émergent des productions non alimentaires». Ils poursuivent en constatant que les légumineuses ne sont pas appropriées à une production de biomasse énergétique, mais que chaque production de biomasse doit trouver une utilisation appropriée. Les auteurs concluent en relevant que du point de vue de la fixation biologique de l'azote, les légumineuses restent attractives dans le secteur des bioénergies si elles sont considérées comme **cultures de couverture**.

La FBA globale est multiple et complexe, le montant global n'est pas connu. La part de la FBA imputable à la symbiose légumineuses et *Rhizobia* est la plus importante et elle présente aussi le potentiel d'augmentation le plus intéressant (Danso 1995). La fixation azotée des légumineuses est de l'ordre de 50 % des besoins actuels en azote agricole, c'est-à-dire environ 85 à 100 millions de tonnes N par année, le reste étant couvert par la fixation industrielle (85 millions de tonnes N par année en 2000), dont nous dépendons pour notre nourriture.

2.1.2 Transfert de l'azote fixé

L'azote biologiquement fixé par l'association légumineuses-*Rhizobia* profite prioritairement aux acteurs de la symbiose. Pourtant le produit de la FBA est généralement excédentaire et une partie de l'azote fixé profite aux plantes voisines appelées plantes accompagnatrices.

«Un faisceau dense d'évidences montrent que l'azote atmosphérique fixé naturellement par les légumineuses peut être transféré directement aux plantes accompagnatrices, néanmoins, un certain nombre de questions fondamentales restent en suspens» (Moyer-Henry et al. 2006).

2.1.2.1 Mécanismes du transfert

L'azote biologiquement fixé par les légumineuses est la source principale d'azote pour les prairies peu ou pas fertilisées où un transfert se fait effectivement vers les plantes non fixatrices d'azote (Auerswald et al. 2010). Selon eux, ce transfert d'azote peut varier dans l'espace et le temps. Dans une prairie pâturée, il est généré par trois mécanismes principaux:



- Le transfert direct in situ entre les plantes vivantes.
- Le transfert différé dans le temps mais localisé là où des plantes non fixatrices colonisent un sol où des légumineuses ou parties de légumineuses sont en décomposition.
- Le transfert différé dans l'espace via les excréments des animaux en pâture.

Ces auteurs concluent que dans le cas d'une pâture, c'est surtout via les excréments que le transfert d'azote biologiquement fixé par les légumineuses s'opère vers les autres plantes.

Jiang SanNai et Zhai MingPu (2000) ont aussi étudié les mécanismes de transfert direct de l'azote dérivé de l'atmosphère vers les plantes non fixatrices. Ils distinguent, au niveau biochimique, 3 possibilités de transfert:

1. L'azote passe sous forme soluble (NO₃) de la racine de la légumineuse dans la solution du sol et peut ainsi être absorbé directement par la plante accompagnatrice.
2. L'azote passe sous forme soluble dans la solution du sol où il est capturé par les hyphes des mycorrhizes accrochées à la racine de la plante accompagnatrice et acheminé vers cette dernière.
3. Dans le cas où les mycorrhizes forment un pont entre les racines de la légumineuse et la plante receveuse, l'azote transite alors directement à travers le champignon sans passer par la solution du sol.

2.1.3 Quantification des transferts

Un très grand nombre de chercheurs ont expérimenté et souvent quantifié le transfert d'azote. Les résultats sont très variables d'un cas à l'autre, en fonction des espèces et des conditions d'expérimentation.

Patra et al. (1986) ont tenté en Inde de mesurer le transfert d'azote atmosphérique entre les pois chiches (*Cicer arietinum L.*) et le blé (*Triticum aestivum L.*) ainsi que le niébé (*Vigna unguiculata L.*) et le maïs (*Zea mays L.*). En conditions de plein champ, le transfert d'azote du niébé au maïs a été de 21,2 kg/ha, soit 28%. Sous serre les taux de transfert entre les légumineuses et les plantes accompagnatrices ont varié de 14 à 32%.

Brophy et al. (1987) ont examiné le transfert d'azote fixé par *Medicago sativa* et *Lotus corniculatus* à *Phalaris arundinacea*, cultivée en lignes. Ils constatent que le transfert peut avoir lieu au-delà de 20 cm de distance entre les plantes et que le taux de transfert augmente avec la proportion de légumineuses dans le mélange. Ils remarquent aussi que la fixation biologique par les légumineuses a été supérieure en troisième année et en culture mélangée pour atteindre 95% de l'azote contenu dans la luzerne et 92% dans le lotier cultivé en mélange avec la graminée contre 86%, respectivement 80% lorsque ces mêmes légumineuses sont cultivées en pur. Ces résultats montrent que le transfert d'azote a bel et bien lieu et que la quantité d'azote transférée est liée, dans ce cas, à la distance entre les espèces et à la proportion des légumineuses dans le mélange.

Burity et al. (1989) dans une expérimentation de plein champ sur 3 ans, associant luzerne (*Medicago sativa L.*) à différentes graminées comme la fléole (*Phleum pratense L.*) et le brome sans arrête (*Bromus inermis Leyss*) confirment que la fixation d'azote par la légumineuse augmente au fil de la saison (62 à 83%) et que le transfert entre la luzerne et les graminées a bien lieu et il a tendance à augmenter avec les années. Il s'est monté à 26% en première année, 46% en deuxième année pour redescendre à 38% en troisième année.



Ces deux résultats sont partiellement confirmés par Gebhart (1991) qui observe le transfert d'azote de la luzerne (*Medicago sativa* L.) vers l'Hycrest, une graminée hybride (*Agropyron desertorum* x *Agropyron cristatum*) ainsi que de *Melilotus alba* vers l'Hycrest. Il constate que la proportion de l'azote biologiquement fixé, contenu dans les légumineuses est supérieure à 53% et augmente avec la proportion de graminées dans le mélange pour culminer avec un rapport graminées/légumineuses de 75/25. La part d'azote dérivé de l'atmosphère est la plus basse dans une culture pure de légumineuses. Il constate aussi que le taux de transfert de l'azote biologiquement fixé par les légumineuses vers les graminées est au maximum dans un mélange graminées/légumineuses de 25/75 et diminue avec la proportion de légumineuses. Il note également que pour les 2 espèces de légumineuses, le transfert peut avoir lieu au-delà d'une distance de 25 cm, en condition de plein champ.

Le transfert d'azote de différents cultivars de trèfle violet (*Trifolium pratense*) au dactyle (*Dactylis glomerata*) a été quantifié par Farnham et al. (1991) lors d'une expérimentation en pots avec un mélange à 50/50. Dans un sol très dépourvu d'azote, stimulant fortement la FBA, les trèfles ont transmis au dactyle entre 30 et 50% de l'azote dérivé de l'atmosphère.

Farnham et George (1993) ont conduit une autre expérimentation en plein champs et sur 2 ans, avec les mêmes espèces et dans le même but. Dans ce cas, le trèfle a fixé entre 72.6 et 159.2 kg N/ha. La proportion de l'azote contenu dans le dactyle et provenant de la FBA du trèfle a varié entre 43.7 et 70.5%. Le transfert de l'azote fixé par le trèfle au dactyle a été de 16.9 kg la première année et de 57.8 kg la deuxième année.

Beschow et al. (2000) ont examiné dans une expérimentation en pots, le transfert direct entre la Luzerne (*Medicago sativa*) et le raygrass anglais (*Lolium perenne*) à différentes concentrations de fumure azotée (20, 200 et 400 mg N/pot). Ils concluent que le transfert d'azote est fortement influencé par le niveau de la fumure azotée et qu'il n'a lieu que lorsque le niveau de fumure azotée est le plus bas (20 mg N/pot) ce qui correspondrait à 20 kg N /ha (Annexe 2). Dans ce cas il l'estime que 50 % de l'azote contenu dans le raygrass provient de la luzerne.

Xiao YanBo et al. (2004) ont mené une expérience visant à quantifier le transfert de l'azote entre 2 plantes communément associées en Chine : la fève (*Vicia faba*) et le blé (*Triticum aestivum*). Cette expérience en pots a fait varier l'intensité du contact entre les racines des deux plantes associées. Les trois niveaux de contact sont définis comme suit : un type de pots sans barrière entre les racines = entremêlement des racines, un autre type de pots avec 2 compartiments séparés par une barrière perméable en nylon (30 micro m) = pas de contact physique mais échange biochimiques possibles via la solution du sol et un type de pot avec 2 compartiments séparés par une barrière imperméable, n'autorisant aucun contact entre les racines. Avec un taux de transfert très faible, de l'ordre de 15%, les auteurs concluent que la distance entre les racines et donc le contact entre les racines est le facteur le plus influant sur le taux de transfert de l'azote biologiquement fixé par la fève vers le blé.

Une série d'expérimentations de plein champ a été conduites par Moyer-Henry et al. (2006) dans des sols à faible teneur en azote, avec d'une part des variétés de soja (*Glycine max*) fixatrices d'azote et des variétés de soja non fixatrices d'azote et d'autre part avec des arachides (*Arachis hypogaea* L.) ou des cultivars de soja fixateurs d'azote et les adventices spontanément présentes. Dans le cas du soja fixateur d'azote vers la variété de soja non-fixateur, le transfert d'azote a été quantifié à 48% de l'azote contenu dans la variété de soja non-fixatrice à maturité. Dans le cas du transfert d'azote fixé par l'arachide ou le soja nodulé



vers les adventices (*Sida spinosa* L. et *Senna obtusifolia* [L.] Irwin & Barneby), les résultats indiquent des quantités d'azote de 30 à 80% transférées en 60 jours. Le transfert d'azote a été le plus bas avec les adventices qui sont connues pour ne pas abriter de mycorrhizes comme *Cyperus esculentus* L. et *Amaranthus palmeri* [S.] Watson, ces résultats cadrent parfaitement avec l'hypothèse que le transfert d'azote a lieu préférentiellement au travers du réseau inter-racinaire tissé par les mycorrhizes. Ces résultats mettent aussi en évidence que le transfert d'azote peut être un facteur favorisant la prolifération d'adventices dans les cultures fixatrices d'azote, lorsque l'azote est peu disponible dans le sol.

Erkovan et al. (2008) ont observé, en Turquie, la fixation et le transfert d'azote du trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) vers différentes graminées : le brome sans arêtes (*Bromus inermis* Leyss.), la fétuque rouge (*Festuca rubra* L.) et le dactyle aggloméré (*Dactylis glomerata* L.). Ils observent, sur une moyenne de 2 ans, une fixation d'azote élevée dans les semis purs de trèfle blanc, et une fixation plus élevée dans les mélanges à forte proportion de trèfle. Le transfert d'azote du trèfle vers les graminées a été de 37.7% vers le dactyle et de 44% vers le brome sans arêtes.

Les différentes estimations et quantifications semblent indiquer un taux de transfert de l'azote biologiquement fixé par les légumineuses vers les plantes accompagnatrices de l'ordre de 40% en moyenne (moyenne de 17 données = 40.2%). Pourtant ce taux peut varier de 15 à 80% car il est influencé par plusieurs paramètres: les espèces concernées, la proportion du mélange, la distance entre les plantes (et donc aussi le contact et l'enchevêtrement des racines), la durée de la culture et le niveau de la fumure azotée. Les mycorrhizes semblent jouer un rôle essentiel dans le transfert d'azote de la plante fixatrice vers la plante accompagnatrice.

2.2 Couverts végétaux et engrais verts

L'utilisation de couverts végétaux est une pratique agro-environnementale largement utilisée en Europe pour réduire les effets négatifs sur le sol nu après récolte en automne et en hiver. Une description détaillée des espèces utilisées fait encore défaut (Bodner et al. 2010).

Fageria (2007) montre que les couverts végétaux sont aussi utilisés, sous diverses formes, depuis plus d'un siècle en Amérique du nord, alors qu'en Chine, les cultures dérobées sont connues depuis 2000 ans (Xiao YanBo et al. 2004).

Le terme engrais vert désigne un couvert végétal destiné à être enfoui dans le sol pour l'enrichir et l'améliorer (Fageria 2007). Le même auteur relève aussi qu'un engrais vert peut être cultivé à base de légumineuses ou d'autres familles botanique, mais qu'il y a de très nombreuses espèces de légumineuses, tropicales ou tempérées, qui possèdent les qualités requises pour faire de bons engrais verts. Seule une minorité a été étudiée à ce jour.

2.2.1 Bénéfices et risques des couverts végétaux

Les objectifs principaux des couverts végétaux sont : l'apport de matière organique, le piégeage des nitrates et la lutte contre l'érosion (Bodner et al. 2010). Cette étude détaille les nombreux bénéfices des couverts végétaux et cite les auteurs suivants:

- Réduction des pertes de nitrates : Thorup-Kristensen (2001), Vidal and Lopez (2005), Rinnofner et al. (2008)
- Amélioration des propriétés physiques du sol : MacRae and Methuys (1985)



- Protection contre l'impact des gouttes de pluie et l'érosion, sous forme de couvert vivant ou de mulch: Quinton et al. (1997), Meyer et al., (1999), Zuazo and Pleguezuelo (2008)
- Stimulation de la vie microbienne du sol : Schutter and Dick (2002)
- Amélioration de la stabilité des agrégats : Liu and Bomke (2005)
- Amélioration des propriétés hydrauliques du sol : Carof et al. (2007), Bodner et al. (2010)

Bodner et al. (2010) mettent en évidence que ces objectifs ne peuvent être atteints que si les espèces cultivées comme couverts végétaux sont adaptées aux conditions locales et environnementales et aussi choisies pour un but agro-écologique visé.

Au Brésil, Fageria (2007) a fait les mêmes observations et il précise que les intérêts pour les engrais verts a augmenté ces dernières années à cause de l'augmentation du prix des engrais chimiques, des risques de pollution et de la tendance vers la recherche de systèmes culturels durables.

En Italie sur monoculture de maïs, Caporali et al. (2004) ont étudié l'utilisation de différents engrais verts : le raygrass italien (*Lolium multiflorum* Lam.), le trèfle souterrain (*Trifolium subterraneum* L.), la vesce velue d'hiver (*Vicia villosa* Roth.). Ils ont pris les adventices spontanées, locales comme témoin. Ils concluent que les engrais verts à base de légumineuses ont bel et bien fourni l'azote pour la culture suivante et ont amélioré le rendement du maïs grain.

Selon Bergstrom et Kirchmann (2004), les engrais verts peuvent être utilisés comme substituts de l'azote chimiques pour les cultures en Suède. Ils ont testé plusieurs espèces comme engrais vert, notamment le trèfle violet (*Trifolium pratense*). Ils concluent qu'il existe pourtant bel et bien aussi un risque de lessivage des nitrates en excès dans les eaux si l'on ne tiens pas compte de la mise en place de la culture suivante pour utiliser cet azote organique dans le délai qui correspond à sa minéralisation.

2.2.2 Améliorer les engrais verts avec des légumineuses

La culture de couverts végétaux associant plusieurs espèces de plantes, des légumineuses et d'autre espèces comme l'avoine rude et la vesce de printemps (*Avena strigosa* et *Vicia sativa*) ou l'avoine rude et le radis à huile (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) permet d'exprimer au maximum les bénéfices des couvert végétaux (Giacomini et al. 2003). Ils constatent en effet que ces associations conjuguent la capacité de produire beaucoup de biomasse de l'avoine et des radis avec la faculté des vesces de fixer de l'azote atmosphérique.

Egalement au Brésil, la même constatation est faite par Fageria et al. (2005) qui observent que des couverts végétaux à base de graminées mobilisent beaucoup d'azote et sont parfois limités dans leur croissance par le manque d'azote disponible. Selon ces chercheurs, des couverts végétaux, associant légumineuses et graminées, représentent la meilleure stratégie pour obtenir le maximum des bénéfices fournis par les couverts végétaux.

Dans la culture du riz au Japon, Khanh et al. (2005), se sont intéressé aux propriétés allélopathiques de certaines cultures de couverts végétaux pour lutter contre les mauvaises herbes, notamment avec des légumineuses. Ils constatent dans certains cas une réduction de 70 % des adventices et une augmentation de 20 % des rendements du riz. Ils concluent se référant aussi à Singh et al. (2003), que: «La rotation des cultures, la culture de couverts



végétaux, les cultures mixtes ou simplement les polycultures comme celles utilisées traditionnellement autrefois, doivent être adaptées aux productions agricoles actuelles».

En Suisse Vuilloud et al. (2006) constatent, après 30 ans de culture sans labour avec des engrais verts, que le stock grainier du sol a tendance à augmenter avec les années. Les apports organiques par les engrais verts et par la restitution des pailles de céréales ont réduit le coefficient d'utilisation de l'engrais minéral en immobilisant de l'azote ce qui pénalise le couvert lui-même et la culture suivante.

Cette « faim d'azote » constatée par Vuilloud et al. (2006), rejoint le constat fait par Fageria et al. (2005) et parle réellement en faveur de l'utilisation des légumineuses comme composantes améliorantes des couverts végétaux en cultures associées.

Les couverts végétaux hivernant sont capables de fournir d'importants bénéfices économiques et environnementaux dans les climats tempérés de l'Amérique du nord. Pourtant le manque de connaissance concernant l'adaptation des populations de couverts végétaux aux contextes agro-environnementaux conduit à des résultats décevants. Pour permettre de maximiser les bénéfices des couverts végétaux, il faut absolument que des agronomes pratiquent une sélection d'espèces en fonction de leurs aptitudes à répondre aux différentes fonctions recherchées dans les écosystèmes (Wilke et Snapp 2008).

2.2.3 Définitions

Quelques définitions permettent de préciser les différents termes désignant les couvertures végétales. Elles permettent aussi de comprendre la démarche agronomique consistant à intégrer dans les couvertures végétales la notion de services agroenvironnementaux, notamment les avantages offerts par les légumineuses.

- **Culture intercalaire = culture dérobée** (= *inter-crop* = *Zwischenkultur*) : en climat subtropical à tempéré, culture secondaire entre 2 cultures principales.
- **Couverts végétaux = couverture de sol** (= *cover-crop* = *Bodenbedeckung*) : culture intercalaire, non destinée à la vente, mais permettant de ne pas laisser le sol nu exposé aux éléments (pluie, vent, soleil, gel).
- **Engrais vert** (= *green manure* = *Gründüngung*) : couvert végétal ayant comme but de recycler et de rendre des éléments nutritifs disponibles pour la nutrition végétale.
- **Culture associée = culture mixte** (= *mixed-crop* = *Mischkultur*) : culture de deux ou plusieurs espèces simultanément dans le même espace de lieu (champ) et temps (période).



3 Matériels et méthodes

3.1 Choix des espèces de légumineuses

Le choix des espèces à tester a été établi sur la base d'une liste exhaustive extraite de «Flora helvetica» et discuté avec les deux responsables de l'encadrement de mon travail : Hans Ramseier à la HAFL de Zollikofen et Raphaël Charles à ACW Changins (Lauber et al. op. 2001). Les critères de sélection ont été nos connaissances préalables des caractéristiques générales des légumineuses dans le climat suisse en relation avec leur aptitude à être utilisées comme couvert végétal: annuelles ou pluriannuelles, grandes ou petites, supposées hivernantes ou non. Nous avons ajouté quelques légumineuses « exotiques » originaires du bassin méditerranéen: pois chiche (*Cicer arietinum*), lentille (*Lens culinaris*), fenugrec (*Trigonella foenum-graecum*) et trigonelle bleue (*Trigonella caerulea*). Après sélection finale, nous avons retenus 25 espèces de légumineuses, dont 2 variétés de pois et 2 variétés de lentilles, c'est-à-dire 27 légumineuses testées.

Pour favoriser la FBA, certaines espèces de légumineuses sont parfois inoculées au semis avec l'espèce de *Rhizobium* qui leur est propre, souvent avec des souches sélectionnées pour leurs performances élevées (Herrige op. 2008). C'est le cas en Suisse pour le soja, le lupin blanc et parfois aussi la luzerne. Cette éventualité a été discutée et nous avons décidé de ne pratiquer aucune inoculation et de travailler en conditions naturelles.

3.2 Trente procédés retenus, choix des densités de semis

Aux 27 légumineuses testées s'ajoute un procédé «sol nu» qui permet de caractériser et de quantifier la flore adventice.

2 plantes de référence, non fixatrices d'azote, complètent l'essai: l'avoine de printemps (*Avena sativa*) et la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*).

Au final l'expérimentation comprend donc trente procédés résumés par le Tableau 2.

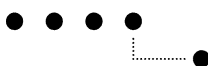


Tableau 2: Liste des espèces par No de procédés

Procédés	Espèces latin	Français	Deutsch
1	<i>Lotus corniculatus</i>	Lotier corniculé	Hornklee
2	<i>Lupinus albus</i>	Lupin blanc	Weisse Lupine
3	<i>Medicago lupulina</i>	Luzerne lupuline	Hopfenklee
4	<i>Medicago sativa</i>	Luzerne cultivée	Luzerne
5	<i>Melilotus albus</i>	Mélicot blanc	Weisser Honigklee
6	<i>Onobrychis viciifolia</i>	Espartette à feuilles de vesce	Espartette
7	<i>Trifolium alexandrinum</i>	Trèfle d'Alexandrie	Alexandrinerklee
8	<i>Trifolium hybridum</i>	Trèfle hybride	Bastardklee
9	<i>Trifolium incarnatum</i>	Trèfle incarnat	Inkarnatklee
10	<i>Trifolium pratense</i>	Trèfle violet	Rotklee
11	<i>Trifolium repens</i>	Trèfle blanc	Weissklee
12	<i>Trifolium resupinatum</i>	Trèfle de Perse	Persischer Klee
13	<i>Trifolium subterraneum</i>	Trèfle souterrain	Erdklee
14	<i>Vicia faba</i>	Fèverole	Ackerbohne
15	<i>Vicia pannonica</i>	Vesce de Hongrie	Ungarische Wicke
16	<i>Vicia sativa</i>	Vesce cultivée / de printemps	Futterwicke
17	<i>Lens culinaris</i>	lentille cultivée (verte)	Linse (grün)
18	<i>Trigonella foenum-graecum</i>	fenugrec	Bockshornklee
19	<i>Vicia villosa</i>	vesce velue / d'hiver	Zottige Wicke
20	<i>Lathyrus sativus</i>	gesse commune	Saat-Platterbse
21	<i>Pisum sativum HARDI</i>	Pois protéagineux " HARDI"	Erbse
22	<i>Pisum sativum ARVIKA</i>	Pois fourrager "ARVIKA"	Erbse
23	<i>Glycine max</i>	soja	Sojabohne
24	<i>Lupinus angustifolius</i>	lupin bleu	Schmalblättrige Lupine
25	<i>Trigonella caerulea</i>	fenugrec	Schapsigerklee
26	<i>Cicer arietinum</i>	pois chiche	Kichererbse
27	<i>Terra nuda</i>	sol nu	Nackte Boden
28	<i>Lens culinaris</i>	Lentille cultivée (canadienne)	Linse (aus Kanada)
29	<i>Avena sativa</i>	avoine de printemps	Sommer Hafer
30	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	phacélie	Phazelia

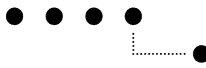
En 2010, les doses de semis choisies sont basées sur les densités usuelles, elles correspondent aux densités utilisées pour la production de graines en grande culture. Au vu des résultats 2010, il a été décidé pour 2011 de procéder à une correction pour les légumineuses à grosses graines, car pour ces espèces la densité permettant d'obtenir rapidement une couverture importante est supérieure à la densité normale pour une récolte en graine. Pour ces 8 espèces, marquées **en gras** dans le Tableau 3, nous avons augmenté les quantités semées en 2011 de façon à obtenir 150 graines /m2 en tenant compte du poids



de 1000 grains des lots disponibles. Cette modification influence le rendement en biomasse et la vitesse de couverture du sol des 8 espèces concernées et ce point devra être pris en considération lors de la mise en valeur de ces résultats.

Tableau 3: Densités de semis et adaptation 2010 et 2011

Procédés	Espèces	Densité de semis kg/ha	
		2010	2011
1	<i>Lotus corniculatus</i>	20	20
2	Lupinus albus	200	525
3	<i>Medicago lupulina</i>	20	20
4	<i>Medicago sativa</i>	25	25
5	<i>Melilotus albus</i>	30	30
6	<i>Onobrychis viciifolia</i>	30	30
7	<i>Trifolium alexandrinum</i>	25	25
8	<i>Trifolium hybridum</i>	30	30
9	<i>Trifolium incarnatum</i>	30	30
10	<i>Trifolium pratense</i>	20	20
11	<i>Trifolium repens</i>	15	15
12	<i>Trifolium resupinatum</i>	25	25
13	<i>Trifolium subterraneum</i>	30	30
14	Vicia faba	160	600
15	<i>Vicia pannonica</i>	100	100
16	<i>Vicia sativa</i>	100	100
17	<i>Lens culinaris</i>	60	60
18	Trigonella foenum-graecum	30	50
19	<i>Vicia villosa</i>	100	100
20	Lathyrus sativus	100	180
21	Pisum sativum sbsp arvense HARDI	200	375
22	<i>Pisum sativum sbsp arvense ARVIKA</i>	200	200
23	Glycine max	100	330
24	Lupinus angustifolius	150	225
25	<i>Trigonella caerulea</i>	60	60
26	Cicer arietinum	200	375
27	sol nu	0	0
28	<i>Lens culinaris, cv. canada</i>	100	100
29	avoine	140	140
30	phacélie	10	10



3.3 Double expérimentation en plein champ

L'expérimentation « screening de légumineuses » est planifiée sur le domaine expérimental d'Agroscope Changins à CH-1263 Nyon durant 2 saisons consécutives après récolte du blé en été 2010 et en été 2011. Selon le protocole préalablement défini à ACW pour les « screening d'espèces », elle comprend un double dispositif simple de micro-parcelles en blocs randomisés (Fig.2).

Le premier dispositif appelé « **Hivernant** » comprend 30 procédés à 3 répétitions. Les parcelles élémentaires sont de 6 x 1.5 m. Les 30 procédés sont 27 légumineuses pures (Tableau 2), les 2 espèces de références (avoine de printemps et phacélie) et le sol nu, servant de contrôle pour les adventices. Ce dispositif ne subit en principe aucune observation (à part la levée) ni récolte en automne mais il est laissé intact afin d'être soumis à l'hivernage (effet du gel) et observé à la sortie de l'hiver et au printemps suivant. Un semis direct est prévu le printemps suivant dans les pailles laissées au sol et les repousses afin d'en observer les contraintes.

Le deuxième dispositif appelé « **Valeur Agronomique Testée** » (**VAT**) est plus complexe. Il comprend aussi 3 répétitions avec les mêmes 30 procédés et il est destiné à subir toutes les observations d'automne, y compris la récolte de biomasse en fin de cycle de végétation. Les parcelles élémentaires, sont de 18 x 1.5 m. Elles sont subdivisées en 3 sous-parcelles de 6 m de longueur. Deux de ces sous-parcelles reçoivent transversalement un semis croisés de 6 m de large : l'une d'avoine de printemps et l'autre de phacélie, permettant ainsi d'observer deux premiers mélanges expérimentaux simples. Ce dispositif particulier (cross split plots) compte donc 270 parcelles.

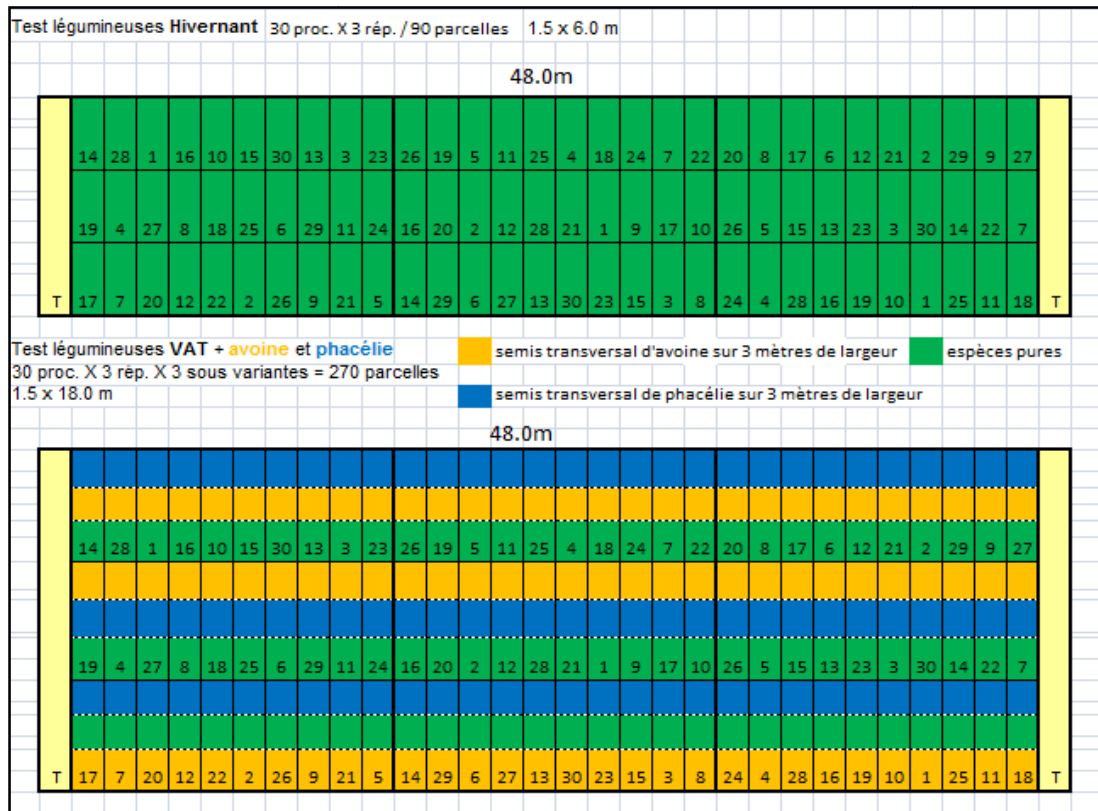


Figure 2: Plan du dispositif expérimental



Ce double dispositif de 360 parcelles élémentaires a pu être mis en place sur la parcelle No 29 du domaine expérimental de Changins le 04.08 2010 dans d'excellentes conditions avec un semoir expérimental de la station de Changins (Plotman WINTERSTEIGER, 15 socs, écartement de 10 cm). Les coordonnées pour l'expérimentation 2010 sont $46^{\circ}23'58''$ N, $6^{\circ}14'25''$ E, l'altitude est de 425 msm.

En 2011 le double dispositif a été mis en place de la même façon, le 03.08 sur la parcelle No 9 du domaine de Changins ($46^{\circ}23'54,5''$ N, $6^{\circ}14'13''$ E, 426 msm) et le 10.08 sur la parcelle « Aviforum » du domaine de l'Ecole d'agriculture de la Rütli (Figure 3) à 3052 Zollikofen ($46^{\circ}59'13''$ N, $7^{\circ}27'37,5''$ E, 544 msm).

Les semis transversaux d'avoine et de phacélie ont chaque fois été réalisés avec un tracteur et un semoir à céréale de 3 m pris sur l'exploitation. Les densités de semis ont été de 66 kg/ha pour l'avoine et de 5 kg/ha pour la phacélie. Directement après le semi, l'ensemble des parcelles expérimentales ont été soigneusement roulées à l'aide d'un rouleau type « crosskil » de 3 m.



Figure 3: Semis à Zollikofen

3.4 Valeur agronomique : observations et récolte des données

Pour définir la valeur agronomique, les observations suivantes ont été faites sur les 3 expérimentations. Les relevés au champ de ces données figurent en Annexe 7 : classeur séparé et sont codifiées dans 3 tableurs Excell (Annexe I).



En cours de végétation:

- Vitesse de levée des plantes testées (nb jours ou pourcentage de levée à 10 jours)
- Couverture du sol par les plantes testées à 25, 35, 45, 55, 65, 75 ± 3 jours (%)
- Couverture du sol par les adventices à 25, 35, 45, 55, 65, 75 ± 3 jours (%)

En fin de végétation:

- Hauteur des plantes (cm)
- Proportion d'adventices dans la biomasse des plantes testées (% volume)
- Aspect visuel des mélanges (1 = mauvais à 10 = bon)
- Proportion de légumineuses dans la biomasse des mélanges (% volume)
- Récolte intégrale, pesée, échantillonnage et séchage des biomasses pour rendements MS/ha et analyses chimiques

Récolte VAT le 6.11. 2010 à Changins :

La récolte des biomasses de l'essai VAT a été faite le 6.11.2010 avec la récolteuse de Changins de marque HALDRUP. Cette machine pèse l'entier de la biomasse verte de chaque parcelle élémentaire. De plus elle prélève, identifie et pèse un échantillon de chaque biomasse récoltée pour séchage et analyses.

En 2010 à Changins la gesse cultivée (*Lathyrus sativus*) n'a pas germé, les graines se sont révélées stériles. Afin de ne pas biaiser l'analyse statistique, cette biomasse manquante a été remplacée par une moyenne pondérée basée sur les valeurs 2011 de Changins et Zollikofen. Ces valeurs de remplacement ont été calculées de façon à produire des valeurs moyennes pour la gesse en proportion de la somme des valeurs des autres espèces des deux essais 2011 (Annexe IX)

Récolte des essais Hivernant le 8.11.2011 à Zollikofen et le 10. 11. 2011 à Changins :

En fin de période de végétation 2011, contrairement à 2010, les 2 essais VAT ne présentaient visuellement que peu de différences de biomasses dans les parcelles mixtes de phacélie et d'avoine. A cause de conditions météo particulières de la saison 2011 (déficit hydrique jusqu'en juillet, suivi de pluies en août et septembre) les plantes accompagnatrices ont largement dominé les mélanges. Dans cette situation, nous avons décidé de récolter uniquement les légumineuses pures des deux essais hivernant, qui présentaient des différences de biomasses bien visibles. Les essais VAT ont été laissés pour l'hivernage et pour les observations du printemps 2012. Cette option nous a permis de nous concentrer sur une récolte de légumineuses pures, extraites à la main sans aucun adventice, pour les analyses de l'azote biologiquement fixé. Nous avons récolté l'essai de Zollikofen (Figure 4) le 8.11.11 et celui de Changins le 10.11.11.



Figure 4: Récolte de l'essai à Zollikofen

Observations au printemps suivant:

Sur l'essai Hivernant 2010 de Changins, et l'essai VAT 2011 de Changins:

- Taux de destruction des plantes testées par le gel
- Couverture par les adventices vivantes
- Couverture par les pailles et résidus et biomasses
- Couverture par les plantes testées vivantes

Sur l'essai Hivernant 2010 de Changins :

- Résistance à la pénétration des socs d'un semis direct de tournesol : 07.04.2011

3.4.1 Analyses chimiques des biomasses

Nous avons limité les analyses chimiques aux espèces qui semblaient présenter les aptitudes les plus intéressantes pour être utilisées dans des cultures mixtes de couverts végétaux. Nous avons donc sélectionné 22 espèces pour leurs intérêts agronomiques ainsi que sur la base des premiers résultats de rendement en biomasse (Tableau 4).



Tableau 4: Liste des espèces analysées

Procédés	Espèces latin	Français
2	<i>Lupinus albus</i>	Lupin blanc
4	<i>Medicago sativa</i>	Luzerne cultivée
5	<i>Melilotus albus</i>	Mélicot blanc
7	<i>Trifolium alexandrinum</i>	Trèfle d'Alexandrie
9	<i>Trifolium incarnatum</i>	Trèfle incarnat
10	<i>Trifolium pratense</i>	Trèfle violet
11	<i>Trifolium repens</i>	Trèfle blanc
12	<i>Trifolium resupinatum</i>	Trèfle de Perse
13	<i>Trifolium subterraneum</i>	Trèfle souterrain
14	<i>Vicia faba</i>	Fèverole
15	<i>Vicia pannonica</i>	Vesce de Hongrie
16	<i>Vicia sativa</i>	Vesce cultivée / de printemps
17	<i>Lens culinaris</i>	lentille cultivée
18	<i>Trigonella foenum-graecum</i>	fenugrec
19	<i>Vicia villosa</i>	vesce velue / d'hiver
20	<i>Lathyrus sativus</i>	gesse commune
21	<i>Pisum sativum HARDI</i>	Pois protéagineux " HARDI"
23	<i>Glycine max</i>	soja
25	<i>Trigonella caerulea</i>	fenugrec
26	<i>Cicer arietinum</i>	pois chiche
29	<i>Avena sativa</i>	avoine de printemps
30	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	phacélie

Sur les échantillons de biomasse homogénéisés de ces espèces récoltées sur l'ensemble des 2 années d'expérimentation, les analyses chimiques suivantes ont été faites au laboratoire Sol-Conseil de Changins:

- Matière Sèche (MS) : 168 biomasses
- Teneurs en cendres et calcul du Carbone total : 168 biomasses
- N total (Kjeldal) : 168 biomasses
- Phosphore (P) total, sur mélange des 3 répétitions : 66 biomasses
- Potasse (K) total, sur mélange des 3 répétitions : 66 biomasses

En 2011, l'analyse du calcium total (Ca) et du magnésium total (Mg) a aussi été faite sur les biomasses (mélanges des 3 répétitions = 66 biomasses) de Changins et de Zollikofen.



La quantité en éléments totaux (N, P, K, Ca, Mg) est exprimée en kilo par hectare (N, P, K, Ca, Mg total kg/ha). Elle est fonction de la biomasse récoltée et de la concentration de cette dernière:

$$N, P, K \text{ total (kg/ha)} = MS (q/ha) \times \% N, P, K \text{ total kg MS}$$

Ces valeurs n'expriment que la part des éléments nutritifs contenus dans la biomasse aérienne et ne disent rien des quantités contenues dans la biomasse souterraine des plantes testées.

En 2010, les analyses chimiques ont été faites sur les échantillons de *biomasse brute* séchés au four puis finement moulu. Cette biomasse brute contenait pour certains procédés une part d'adventices plus ou moins importante. Afin de corriger ce biais, en 2011 un échantillon de légumineuses pures a été récolté à la main pour les 22 procédés retenus dans chaque expérimentation. Ces échantillons de biomasse, totalement exempts d'adventices, ont été séchés puis broyés et analysés. Consécutivement, la quantité d'éléments totaux contenus dans les biomasses aériennes a pu être calculée sur la base de la *biomasse nette* en 2011, ce qui garantit une meilleure fiabilité de ces valeurs.

3.4.2 Analyses de sol

Des analyses de sol ont été faites par le laboratoire Sol-Conseil (Annexe II) sur les paramètres suivants des parcelles expérimentales :

- Granulométrie : test tactile
- PH : pH-mètre
- Matière organique : combustion
- Teneurs en P, K et Mg : méthode d'extraction à l'acétate lactate d'ammonium

Des analyses de l'azote minéralisé (Nmin) ont aussi été faites en automne sur les sols nus, et en 2011 aussi sur les parcelles phacélie et fèverole après la récolte des biomasses.

3.5 Détermination de la dynamique de croissance des espèces

La vitesse d'établissement de la biomasse est un des paramètres intervenant dans la compétition des espèces pour la lumière, l'eau et les nutriments. Les taux de couverture du sol par les espèces testées ont été observés dans chaque expérimentation dès la levée et ensuite à un intervalle de 10 jours \pm 3 jours, jusqu'à la récolte. Ces données permettent de visualiser la dynamique de croissance de chaque espèce testée. Pour ce faire nous avons utilisé la fonction de Gompertz telle que proposée par Bodmer et al. (2010):

$$y_i = y_{max,G} \exp \left\{ - \exp \left(k_G (t_i - t_{max,G}) \right) \right\}$$

y_i (%) = couverture du sol au jour t_i (jours) après semis

$y_{max,G}$ (%) = couverture maximale

k_G = taux de croissance par jour

$t_{max,G}$ (jour) = temps pour atteindre le taux de croissance maximum par jour



3.6 Méthode de l'Abondance Naturelle de l'isotope N¹⁵, choix de 2 espèces de référence

Afin de répondre à la question de recherche « combien d'azote atmosphérique est fixé par les différentes légumineuses testées », la meilleure méthode est identifiée comme étant la méthode de l'Abondance Naturelle (NA) de l'isotope 15 de l'azote. Elle ne nécessite pas d'engrais labellisé avec de l'azote N¹⁵, qui est extrêmement coûteux et polluant, elle est relativement fiable comparée aux autres méthodes et s'applique bien aux expérimentations de plein champs (Unkovich et al. 2008).

Le principe est le suivant:

La concentration de l'isotope N¹⁵ de l'azote (en pour mille) est constante dans l'atmosphère par rapport à celle des atomes N¹⁴ (=0.43‰). Par convention, elle est théoriquement réputée à zéro pour mille. Elle est par contre légèrement plus élevée dans le sol, car l'isotope lourd N¹⁵ a tendance à s'y accumuler par sa densité. La nutrition azotée des légumineuses est mixte : elles utilisent aussi bien l'azote de la solution du sol, si disponible, que l'azote biologiquement fixé par les bactéries *Rhizobium* (cf. chapitre 3). Pour calculer la part d'azote biologiquement fixée par une légumineuse, appelée «pourcent d'azote dérivé de l'atmosphère» (% Ndfa) il s'agit de calculer un ratio à partir de ces différences de concentration en N¹⁵. Ce calcul est basé sur la différence de concentration delta (δ)¹⁵N en pour mille de la biomasse aérienne d'une légumineuse complètement dépendante de la FBA donc proche de zéro pour mille (A cultivée dans du sable) avec celle d'une légumineuse en nutrition mixte (B cultivée dans le sol) et à celle d'une plante de référence (C cultivée dans le même sol) ne fixant pas d'azote atmosphérique.

La figure suivante montre par un exemple théorique le fonctionnement de cette méthode selon (Unkovich et al. 2008).

Dans nos expérimentations nous utilisons les deux plantes de références, non fixatrices d'azote préalablement citées, qui sont l'avoine de printemps (*Avena sativa*) et la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*).

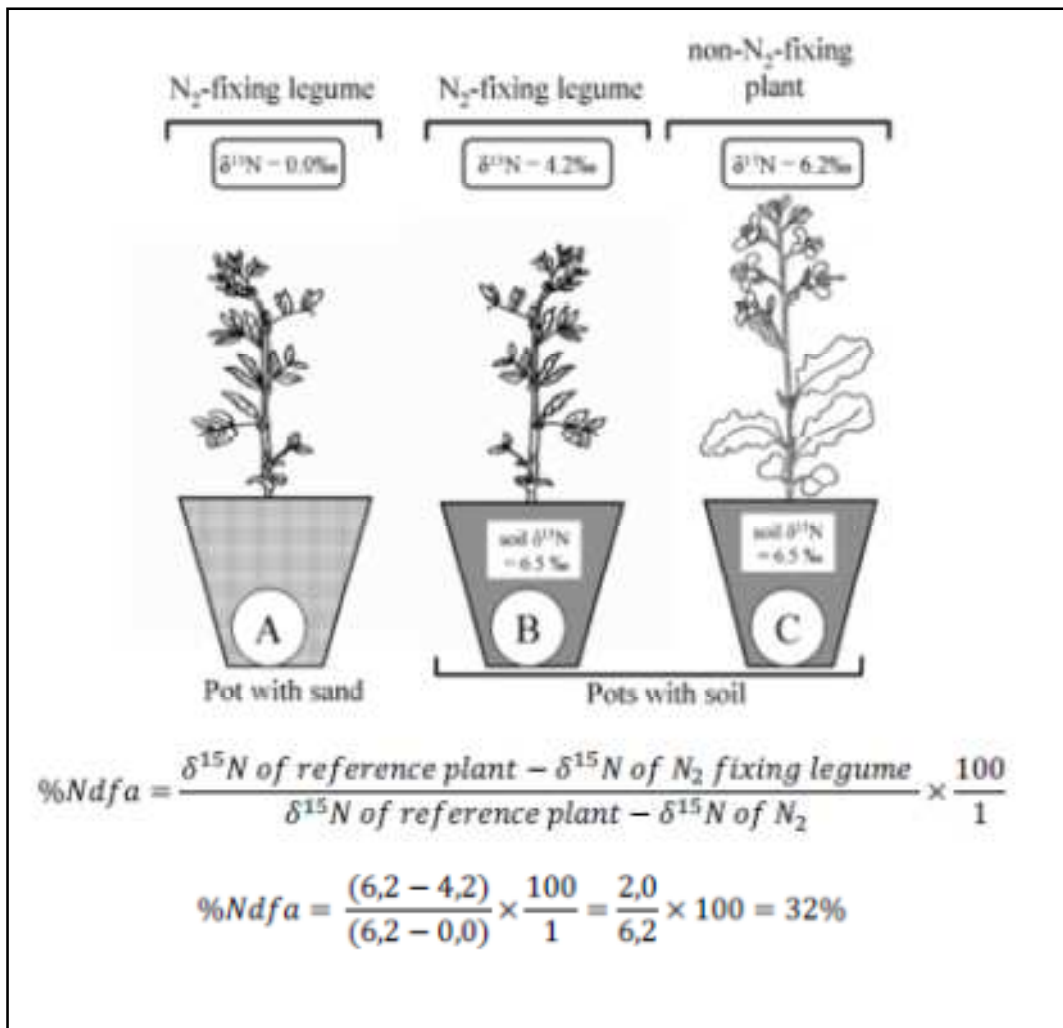


Figure 5: Schéma de la méthode de l'Abondance Naturelle (Unkovich et al. 2008)

3.6.1 Valeur Beta et correction de concentration azotée

Comme déjà mentionné, la différence de concentration $\delta^{15}N$ moyenne d'une légumineuses totalement dépendante de la FBA est pratiquement égale à zéro, c'est-à-dire identique à la concentration atmosphérique. Il faut pourtant faire une distinction entre la différence de concentration $\delta^{15}N$ de la biomasse aérienne des légumineuses qui est souvent inférieure à zéro et celle de la biomasse souterraine qui est souvent supérieure à zéro. Cette distinction est nécessaire car il n'est pas possible de récolter proprement la biomasse souterraine dans une expérimentation de plein champ et les analyses d'azote sont faites uniquement sur la biomasse aérienne. Les valeurs doivent donc être corrigées à la hausse pour tenir compte du fractionnement de la teneur en azote lourd entre la partie aérienne et la partie souterraine de la plante.

Cette correction peut être faite en incluant dans l'équation théorique de l'exemple précédent une « valeur Beta » (B-value). Cette valeur Beta exprime la différence de concentration $\delta^{15}N$ de la biomasse aérienne d'une légumineuse cultivée en situation de complète dépendance de la FBA (dans un pot de sable) par rapport à l'ensemble de la plante. Elle est issue d'une analyse N^{15} de la biomasse aérienne d'une telle légumineuse récoltée au même stade



végétatif que les plantes de plein champ. Cette valeur Beta est spécifique à l'espèce. La littérature donne des tables pour les valeurs Beta connues, elles varient pourtant beaucoup pour la même espèce (Unkovich et al. 2008). Pour cette raison, nous avons donc décidé d'établir nos propres valeurs Beta. Cette expérimentation séparée en serre a été menée sous la responsabilité de Hans Ramseier à la HALF de Zollikofen durant la même période que les expérimentations de l'été 2011. Les détails de cette expérimentation sont présentés dans le chapitre suivant.

Tenant compte de la valeur Beta, l'équation peut donc être écrite de la manière suivante :

$$\%Ndfa = \frac{\delta^{15}N \text{ de la plante de référence} - \delta^{15}N \text{ de la légumineuse fixatrice de } N_2}{\delta^{15}N \text{ de la plante de référence} - B} \times \frac{100}{1}$$

3.6.2 Détermination des valeurs Beta

Pour déterminer les valeurs Beta, une expérimentation séparée en pots de 5 litres, a été conduite en été 2011 à Zollikofen. Un inoculum de *Rhizobia* provenant de Changins (parcelle 29, ayant accueilli les expérimentations en 2010) a été obtenu par éluat d'un échantillon de sol frais, prélevé entre 0 et 30 cm. Cet inoculum a permis d'ensemencer le sol artificiel stérile contenu dans les pots.

Cette expérimentation a été faite selon la méthode proposée par Unkovich et al (2008), mentionnée au chapitre 3.2.1. Les instructions adaptées et détaillées de cette méthode proviennent du Dr. F. Liebisch, de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich (ETHZ), qui nous a procuré l'encadrement scientifique pour cette expérimentation ainsi que pour la préparation des échantillons de biomasse destinés aux analyses isotopiques. La description de cette méthode ainsi que la recette de la solution nutritive utilisée et un bref compte rendu des différentes étapes de l'expérimentation figurent en Annexe 3.

Les 22 espèces choisies ont été cultivées avec 3 répétitions (66 pots), sans aucun apport d'azote, en dépendance totale de la fixation biologique. Après une durée de culture de 88 jours sous serre, les biomasses ont été récoltées et séchées dans l'étuve à 50 °C jusqu'à poids constant. Sur la base des analyses de la concentration en N¹⁵ de ces biomasses, il nous a été possible de quantifier nos propres valeurs Beta.

Ces valeurs Beta sont importantes car elles sont spécifiques à nos conditions d'expérimentation :

- elles correspondent exactement aux espèces et cultivars utilisés dans les 3 expérimentations de pleins champs en 2010 et 2011
- elles proviennent de la même période de culture: début août à début novembre, donc même photopériode que les expérimentations et même stade phénologique à la récolte
- les pots contenant un sol artificiel inerte et stérilisé ont été inoculés en *Rhizobia* avec un extrait du sol de la parcelle 29 de Changins, où ont été récoltées les légumineuses de l'essai 2010, donc en principe contenant une population indigène et correspondante de *Rhizobia*.

Sur ce point, il faut relever que cet inoculum bactérien correspond aussi aux conditions d'essai 2011 de Changins, car la parcelle No 29 est distante de seulement 300 m de la parcelle No 8. Par contre il induit un biais quant aux teneurs d'azote dérivé de l'atmosphère (% Ndfa) de l'expérimentation Zollikofen 2011. Cette expérimentation «valeurs Beta» est



trop coûteuse en ressources pour être répétée avec un inoculum spécifique à la parcelle Aviforum de Zollikofen et les mêmes valeurs Beta seront utilisées pour calculer le %Ndfa des légumineuses de l'essai de Zollikofen 2011.

3.6.3 Analyses isotopiques de N¹⁵

Afin de pouvoir quantifier l'azote atmosphérique fixé, selon la méthode NA, des analyses de l'isotope N¹⁵ ont été faites au spectromètre de masse par le laboratoire « Isolab » de l'ETHZ sur l'ensemble des échantillons : (198). Les mêmes analyses N¹⁵ ont été faites sur les biomasses des 22 espèces cultivées à Zollikofen avec 3 répétitions pour la détermination de nos valeurs Beta. Cette analyse nécessite une préparation spéciale des biomasses qui doivent être broyées finement avec un moulin à billes de type « Retsch » (Figure 6). Ensuite il s'agit d'encapsuler manuellement une quantité de l'ordre de quelques microgrammes, pesés en fonction de la teneur en azote total de la biomasse, dans une feuille d'étain. Ces « boulettes » minuscules seront brûlées par le spectromètre de masse qui livrera les teneurs en N¹⁵.



Figure 6: Moulin à billes Retsch et confection des « boulettes »

Les biomasses sont identiques à celles qui ont précédemment permis l'analyse en azote total au laboratoire Sol-Conseil. Donc la même distinction est à faire que précédemment: (Changins 2010 = biomasse brute, Changins et Zollikofen 2011= biomasse nette) afin de corriger en 2011 le biais constaté en 2010, comme expliqué au chapitre 3.4 (Valeur agronomique : observations et récolte des données).

Cette analyse a fourni une valeur appelée $\delta^{15}\text{N}$ (en ‰) pour les 20 espèces de légumineuses retenues et pour les 2 plantes de référence. Cette valeur exprime pour chaque espèce la différence de concentration en N¹⁵ dans l'azote total de la plante par rapport à la concentration atmosphérique stable (0.43‰), réputée être à 0.



Ces valeurs $\delta^{15}\text{N}$ nous permettent donc de calculer selon la formule de Unkovich et al (2008), le %Ndfa de chaque espèce en référence avec a) l'avoine et b) la phacélie.

La moyenne de ces 2 valeurs %Ndfa, obtenues avec chacune des 2 plantes de référence, nous permet ensuite de calculer la quantité d'azote dérivé de l'atmosphère (Ndfa kg/ha) pour chaque espèce de légumineuses testée.

3.7 Limites de la méthode NA

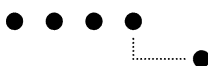
La méthode de l'abondance naturelle de l'isotope N^{15} est certainement la mieux adaptée aux expérimentations « on farm » et de plein champ. Elle a pourtant ses limites et sa précision n'est pas absolue. C'est donc une méthode qui permet une estimation fiable (reproductible) et non pas la quantification précise des quantités d'azote biologiquement fixé par les légumineuses (Unkovich et al. 2008).

L'imprécision de la méthode NA est causée essentiellement par 2 facteurs :

- la variation des résultats de mesures des valeurs Beta qui peut être calculée avec une analyse de sensibilité, mais n'a que peu d'influence sur le résultat %Ndfa (Gehring et al. 2005) et n'a donc pas été entreprise dans cette étude.
- la discrimination isotopique spatiale telle que décrite par Mariotti et al. (1980)

3.8 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été faites avec le logiciel libre R.2.13.1 Les analyses de variance et des tests de comparaisons multiples (Duncan et Tukey) ont été pratiqués pour analyser les données. Les scripts R utilisés, couplés à leurs bases de données, figurent en annexes électroniques (Annexes VII à XII).



4 Résultats et discussion

4.1 Données pédologiques

A Changins, les données pédologiques des parcelles expérimentales sont bien documentées, ces données ont été utilisées pour la parcelle No 29 en 2010.

En 2011, nous avons prélevé de nouveaux échantillons de sol (0-30 cm) dans les 2 parcelles expérimentales de Changins et de Zollikofen. Les résultats (Annexe II) sont résumés dans le Tableau 5.

Tableau 5: Données pédologiques des 3 sites d'expérimentations

Site	Année	Argile	Silt	Sable	pH	M O	P	K	Mg
		%	%	%		%	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Changins	2010	41	34	25	6.9	3.4	53	178	206
Parcelle 29									
Changins	2011	23	43	34	7.4	2.0	80	171	146
Parcelle 8									
Zollikofen	2011	20	33	47	7.7	4.0	119	103	115
Aviforum									

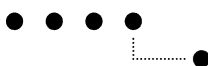
Ces données montrent des sols moyens à lourds (Changins parcelle 29), neutres à alcalin (Zollikofen), relativement bien pourvus en matière organique et en éléments nutritifs. La parcelle « Aviforum » de Zollikofen est particulièrement riche en M.O. et en P, mais moins bien pourvue en K et Mg que les 2 parcelles de Changins, ce qui peut s'expliquer par la présence d'une porcherie sur l'exploitation de la Rütli.

Les teneurs en azote du sol sont fugaces. Une appréciation de la situation peut être faite que pour une courte période par une analyse de l'azote minéralisé (Nmin.). Les valeurs Nmin du sol nu en automne sont résumées dans le tableau suivant pour les 3 sites d'expérimentation.

Tableau 6: Nmin azote utilisable en kg N/ha

site	parcelle	date	Profondeur de prélèvement			Total
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
Changins	No 29	03.09.2010	25.76	20.06	6.28	52.1
Changins	No 8	15.11.2011	26.48	29.29	22.47	78.24
Zollikofen	Aviforum	15.11.2011	55.03	41.05	28.01	124.09

La parcelle de Zollikofen est particulièrement riche en azote minéralisé, ce qui est un handicap pour mettre en valeur la FBA car cette situation limite le transfert de l'azote (Beschow et al. 2000). En présence d'une quantité élevée d'azote assimilable dans la solution du sol, la plupart des légumineuses utilisent aussi prioritairement cette source d'azote, car la FBA est coûteuse métaboliquement (Brehmer et al. 2008). Ce site complète en revanche bien la situation des 2 parcelles de Changins, nettement moins bien pourvues



en azote minéralisé. Le prélèvement 2010 à Changins n'est pas très opportun car fait trop tôt.

4.2 Données météo

Les principales données météo concernant la période de végétation, du 1^{er} juillet au 15 novembre, sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 7: Données météo du 1^{er} juillet au 15 novembre

Site	Année	T moyenne	T max	T min	Nb jours de gel en octobre	Cumul précipitation mm	ETP mm
		°C	°C	°C			
Changins	2010	15.8	34.4	-0.6	3	309	379
Changins	2011	16.0	33.8	0.7	0	353.6	368.2
Zollikofen	2011	14.3	32.9	-3.2	4	352.8	352.8

En 2011 les précipitations a été régulière sur les 2 sites.

En 2010 les conditions ont été nettement plus sèches qu'en 2011. Le cumul de précipitation 2010 a été inférieur de 12 % par rapport à 2011 et en 2010 à Changins, un quart des précipitations ont eu lieu après la fin d'octobre, c'est-à-dire en toute fin de cycle végétatif.

4.3 Rendement en biomasse des plantes testées

Le rendement en biomasse aérienne des plantes testées est à la base de l'essentiel des résultats obtenus. C'est donc logiquement ces données qui sont tout d'abord analysées.

4.3.1 Biomasse brute et biomasse nette

L'analyse statistique des rendements en biomasse, a été faite tout d'abord séparément pour chaque essai. Elle a été conduite sur le rendement en biomasse brute (MS brut q. /ha) à l'aide d'une analyse de variance doublée d'un test de Duncan pour chaque essai (Annexe VII). La biomasse brute comprend la biomasse des plantes testées et la biomasse des adventices.

Les résultats sont présentés par les 3 graphiques suivants (Figure 7). Les espèces n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles ($p=0.05$).

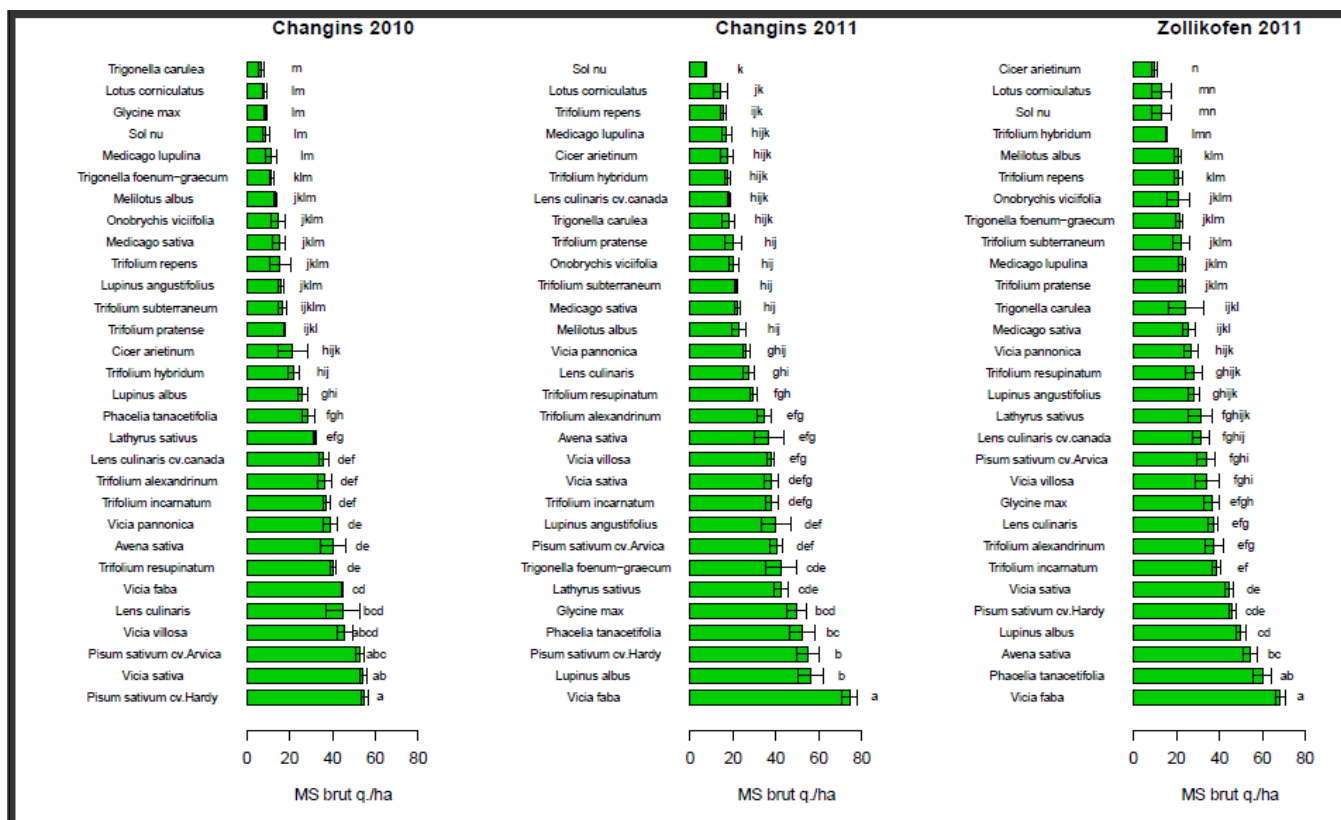


Figure 7: Biomasse brute moyenne (q.MS/ha) récoltée dans les 3 essais, test de Duncan

Cette première analyse statistique démontre que des groupes d'espèces présentent des rendements en biomasse brute significativement différents entre eux dans le cadre de l'essai concerné.

Ensuite pour déterminer s'il est possible et correct de grouper les données des 3 essais pour les analyser globalement, une analyse de variance spéciale « multi-site » a été conduite sur l'ensemble des 3 essais, ceci afin de mettre en évidence d'éventuelles interactions (Annexe VII). Les résultats obtenus en R sont présentés dans le Tableau 8:

Tableau 8: Analyse du rendement de biomasse brute (kg MS/ha) des 3 essais

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr (>F)	
site-année	2	1036.06	518.03	3.3883	0.1036	
Residuals	6	917.33	152.89			
procédés	29	45151	1556.95	47.5974	< 2.2e-16	***
procédés:site-année	58	13863	239.01	7.3069	< 2.2e-16	***
Residuals	174	5692	32.71			

Singnificance codes: '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05 ; '.' 0.1

L'interprétation de cette analyse de variance multi-site démontre que :

- Il n'y a pas de différences significatives de rendement en MS brute entre les sites
- Les procédés sont hautement significativement différents entre eux ($p < 0.001$)



- **Il existe une interaction** entre procédé et site-année hautement significative ($p < 0.001$)

Cette constatation nous oblige donc logiquement à **considérer chaque essai séparément** pour les mises en valeur statistiques strictes. Cette règle n'empêche pas de présenter en parallèle des résultats regroupant les 3 essais (moyenne arithmétique des données des 3 essais) mais elles doivent être interprétés avec les limites induites par le phénomène d'interaction constaté: l'essai (site*année) influence aussi de manière hautement significative sur les valeurs observées, donc les moyennes sont à interpréter avec la prise en compte de ce phénomène.

Le nombre élevé des procédés rend la présentation graphique de 3 essais juxtaposés difficile à lire (Figure 7). La présentation des résultats sous forme de tableau est mieux adaptée car les procédés sont alignés. Cette disposition offre aussi la possibilité de juxtaposer la moyenne des 3 essais ainsi que son écart-type qui permet de juger de la dispersion des données.

Les valeurs moyennes des rendements en MS brute et en MS nette sont résumées dans le Tableau 9 et le Tableau 10 pour les 3 expérimentations séparées.

Les résultats présentés dans le Tableau 9 reprennent ceux de la Figure 7, avec l'avantage de les rendre mieux lisibles et plus faciles à interpréter.

Les rendements bruts varient entre moins de 10 q./ha à plus de 60 q./ha. Le groupe au-dessus de 40 q. /ha est représenté, outre l'avoine et la phacélie, par les pois, le lupin blanc, la vesce de printemps et la fèverole. Les plus faibles rendements, en dessous de 20 q. /ha, regroupent 8 espèces de petite taille, à développement plus lent, en particulier les pluriannuelles et pour 2 espèces originaires de climat chaud (*cicer arietinum* et *trigonella caerulea*), probablement mal adaptées à nos conditions et n'ayant pas rencontré leur partenaire symbiotique dans nos sols (chapitre 3.1).

Les espèces avec un écart-type élevé, comme le soja, la fèverole, les lupins, le fenugrec et la phacélie présentent des écarts de rendements importants. La plupart des trèfles, les luzernes, les vesces de printemps et velue ainsi que les pois présentent par contre une bonne stabilité des rendements. La meilleure stabilité de rendement est obtenue par le trèfle incarnat et le trèfle d'Alexandrie.

La même analyse statistique a été faite sur les rendements en biomasse nette (MS net q. /ha), obtenus en déduisant la proportion d'adventices observée visuellement à la récolte (% biomasse) de la quantité totale récoltée :

$$\text{Biomasse nette (MS q/ha)} = \text{Biomasse brute (MS q/ha)} - \text{Biomasse adventice (MS q/ha)}$$

Cette seconde analyse statistique (Annexe VII.) fait apparaître cette fois une variation des procédés entre les 3 essais (site-année): $p < 0.05$ pour (MS net q. /ha).

Pourtant, la même interaction hautement significatives ($p < 0.001$) entre procédés et site-année est présente, ce qui confirme la nécessité de considérer les résultats de chaque essai séparément pour l'interprétation statistique. Les résultats des rendements en matière sèche nette sont présentés dans le Tableau 10.

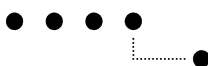


Tableau 9: Moyennes des rendements en matière sèche brute (q./ha)

Espèces	Changins*		Zollikofen*	Moyenne 3 essais	Ecart- type
	2010	2011	2011		
Sol nu	9 ij	7.2 k	13.3 mn	9.8	3.1
<i>Lotus corniculatus</i>	8.4 ij	14.2 jk	13.1 mn	11.9	3.1
<i>Cicer arietinum</i>	21.5 efgh	17.3 hijk	9.9 n	16.3	5.9
<i>Trigonella caerulea</i>	6.8 j	18 hijk	24.3 ijkl	16.4	8.8
<i>Medicago lupulina</i>	11.2 hij	17.1 hijk	22.6 jklm	16.9	5.7
<i>Trifolium repens</i>	15.6 ghij	15.7 ijk	20.9 klm	17.4	3
<i>Trifolium hybridum</i>	21.9 efg	17.4 hijk	15.6 lmn	18.3	3.2
<i>Onobrychis viciifolia</i>	14.6 ghij	20.3 hij	21.1 jklm	18.7	3.5
<i>Melilotus albus</i>	13.6 ghij	22.5 hij	20.7 klm	18.9	4.7
<i>Trifolium subterraneum</i>	16.6 fghij	21.3 hij	22.4 jklm	20.1	3
<i>Trifolium pratense</i>	17.5 fghi	20.2 hij	22.7 jklm	20.1	2.6
<i>Medicago sativa</i>	15.2 ghij	22.1 hij	25.6 ijkl	21	5.3
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	11.6 ghij	42.1 cde	21.3 jklm	25	15.6
<i>Lupinus angustifolius</i>	16 ghij	40.1 def	28.1 ghijk	28.1	12.1
<i>Lens culinaris cv Canada</i>	36 cd	18 hijk	31.5 fghij	28.5	9.3
<i>Vicia pannonica</i>	39.1 c	26.3 ghij	26.6 hijk	30.7	7.3
<i>Glycine max</i>	8.9 ij	49.8 bcd	36.6 efgh	31.7	20.9
<i>Trifolium resupinatum</i>	40.6 c	29.5 fgh	28.1 ghijk	32.7	6.9
<i>Trifolium alexandrinum</i>	36.3 cd	34.7 efg	37.7 efg	36.2	1.5
<i>Lens culinaris</i>	45 bc	27.1 ghi	37.1 efg	36.4	9
<i>Lathyrus sativus</i>	NA ¹	42.3 cde	31.1 fghijk	36.7	7.9
<i>Trifolium incarnatum</i>	37.3 cd	38.1 defg	38.5 ef	38	0.6
<i>Vicia villosa</i>	45.9 abc	37.6 efg	34.3 fghi	39.2	5.9
<i>Pisum sativum cv Arvika</i>	52.7 ab	40.2 def	33.8 fghi	42.2	9.6
<i>Avena sativa</i>	40.3 c	36.6 efg	54.6 bc	43.8	9.5
<i>Lupinus albus</i>	26 ef	56 b	50.1 cd	44	15.9
<i>Vicia sativa</i>	54.4 ab	38 defg	44.7 de	45.7	8.2
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	28.6 de	52.3 bc	60.2 ab	47	16.5
<i>Pisum sativum cv Hardy</i>	54.9 a	55.2 b	46.1 cde	52.1	5.1
<i>Vicia faba</i>	44.7 bc	74.5 a	68.5 a	62.6	15.7

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)
¹Not available



Les rendements nets varient en moyenne des 3 essais entre moins de 5 q. /ha pour le lotier corniculé à près de 60 q. /ha pour la fève (Tableau 10).

Les groupes des 2 extrêmes (> 40q./ha et < 20 q./ha) sont composés des mêmes espèces avec 3 espèces supplémentaires dans le groupe inférieur : le trèfle violet, le trèfle souterrain et la luzerne cultivée.

Les mêmes espèces présentent les mêmes aptitudes quant à la stabilité des rendements. Les rendements très stables du trèfle d'Alexandrie et du trèfle incarnat sont confirmés.

La comparaison des niveaux de rendement de MS brute et nette ainsi que leur stabilité (écart-types), indique que la pression des adventices est globalement faible ou bien contrôlée par la plupart des espèces testées.

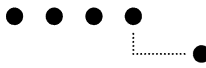


Tableau 10: Moyenne des rendements: matière sèche nette (q/ha)

Espèces	Changins*		Zollkofen*	Moyenne 3 essais	Ecart-type
	2010	2011	2011		
Sol nu	0.0 l	0.0 j	0.0 k	0.0	0.0
<i>Lotus corniculatus</i>	3.3 jkl	6.0 ij	4.3 jk	4.6	1.4
<i>Onobrychis viciifolia</i>	6.7 ijkl	14.1 fg	10.1 ij	10.3	3.7
<i>Cicer arietinum</i>	17.2 gh	11.1 fghij	4.0 jk	10.8	6.6
<i>Medicago lupulina</i>	6.7 ijkl	10.2 ghij	15.9 ghi	10.9	4.6
<i>Trifolium repens</i>	11.2 hijk	9.7 hij	14.7 ghi	11.9	2.6
<i>Trifolium hybridum</i>	14.4 ghi	11.3 fghij	11.1 hij	12.3	1.9
<i>Trigonella caerulea</i>	4.4 jkl	14.7 fg	21.5 efg	13.5	8.6
<i>Trifolium pratense</i>	11.0 hijk	14.0 fg	16.1 ghi	13.7	2.5
<i>Melilotus albus</i>	10.1 hijk	17.2 fg	15.7 ghi	14.3	3.8
<i>Trifolium subterraneum</i>	12.8 ghij	17.0 fg	14.9 ghi	14.9	2.1
<i>Medicago sativa</i>	11.5 hijk	20.3 fg	22.7 efg	18.2	5.9
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	9.0 hijkl	38.4 cd	17.6 fg	21.7	15.1
<i>Lupinus angustifolius</i>	9.9 hijk	36.5 d	21.2 efg	22.6	13.4
<i>Lens culinaris cv.Canada</i>	32.4 de	15.0 fg	25.2 def	24.2	8.7
<i>Vicia pannonica</i>	35.2 de	19.0 fg	20.0 fg	24.7	9.1
<i>Trifolium resupinatum</i>	34.4 de	21.7 fg	26.1 def	27.4	6.4
<i>Glycine max</i>	2.0 kl	48.3 bc	34.1 d	28.1	23.7
<i>Lens culinaris</i>	40.5 cd	22.3 ef	32.0 d	31.6	9.1
<i>Trifolium incarnatum</i>	30.0 ef	32.7 de	32.5 d	31.7	1.5
<i>Trifolium alexandrinum</i>	31.7 de	32.4 de	31.9 d	32.0	0.4
<i>Lathyrus sativus</i>	NA ¹	39.9 cd	29.5 de	34.7	7.3
<i>Vicia villosa</i>	44.8 bc	35.7 d	32.3 d	37.6	6.5
<i>Lupinus albus</i>	21.5 fg	56.0 b	46.8 bc	41.4	17.9
<i>Avena sativa</i>	40.3 cd	36.0 d	48.2 bc	41.5	6.2
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	52.7 ab	40.2 cd	33.3 d	42.1	9.8
<i>Vicia sativa</i>	54.0 a	35.4 d	43.9 c	44.5	9.3
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	26.7 ef	52.3 b	55.0 ab	44.7	15.7
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	53.6 a	55.2 b	44.6 c	51.1	5.7
<i>Vicia faba</i>	41.0 cd	74.5 a	62.7 a	59.4	17.0

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)
¹Not available



4.4 Dynamique de croissance des espèces

La fonction de Gompertz (Chapitre 3.6) permet de modéliser la dynamique de croissance de chaque espèce pour chaque expérimentation, sur la base des 7 observations de couverture ; un huitième point est ajouté en prenant zéro pour le jour du semis.

Dans une minorité de cas et pour certaines espèces seulement, ces 8 points ne suffisent pas à modéliser une courbe. Dans ce cas, des points fictifs (noises), ont du être ajoutés de manière alléatoire pour permettre de modéliser la dynamique de croissance: en vert les courbes réalisées avec les 8 points d'observation et en rouge les courbes tracées à l'aide de points fictifs (Figure 8).

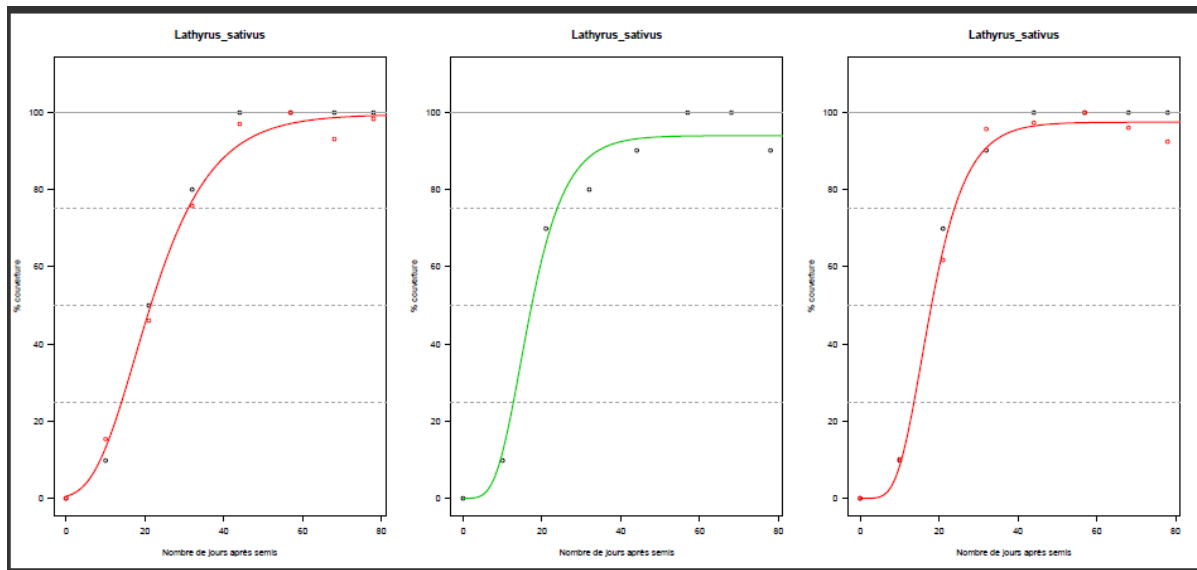


Figure 8: Courbes de croissances pour la gesse cultivée, Changins 2011

L'ensemble de ces courbes, calculées à l'aide de la modélisation, sont consultables en Annexe VIII. Elles permettent de visualiser la dynamique de croissance de chaque espèce testée.

Cette fonction permet aussi de calculer un taux de couverture précis pour un jour donné et inversement le nombre de jours nécessaires pour un taux de couverture donné.

Les nombre de jours pour atteindre 50% et 75 % de couverture de sol ont été calculés (Annexe VIII). Ces valeurs sont ensuite comparées par un test de Duncan pour Changins en 2010. Elles sont présentées par la Figure 9. Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles ($p < 0.5$).

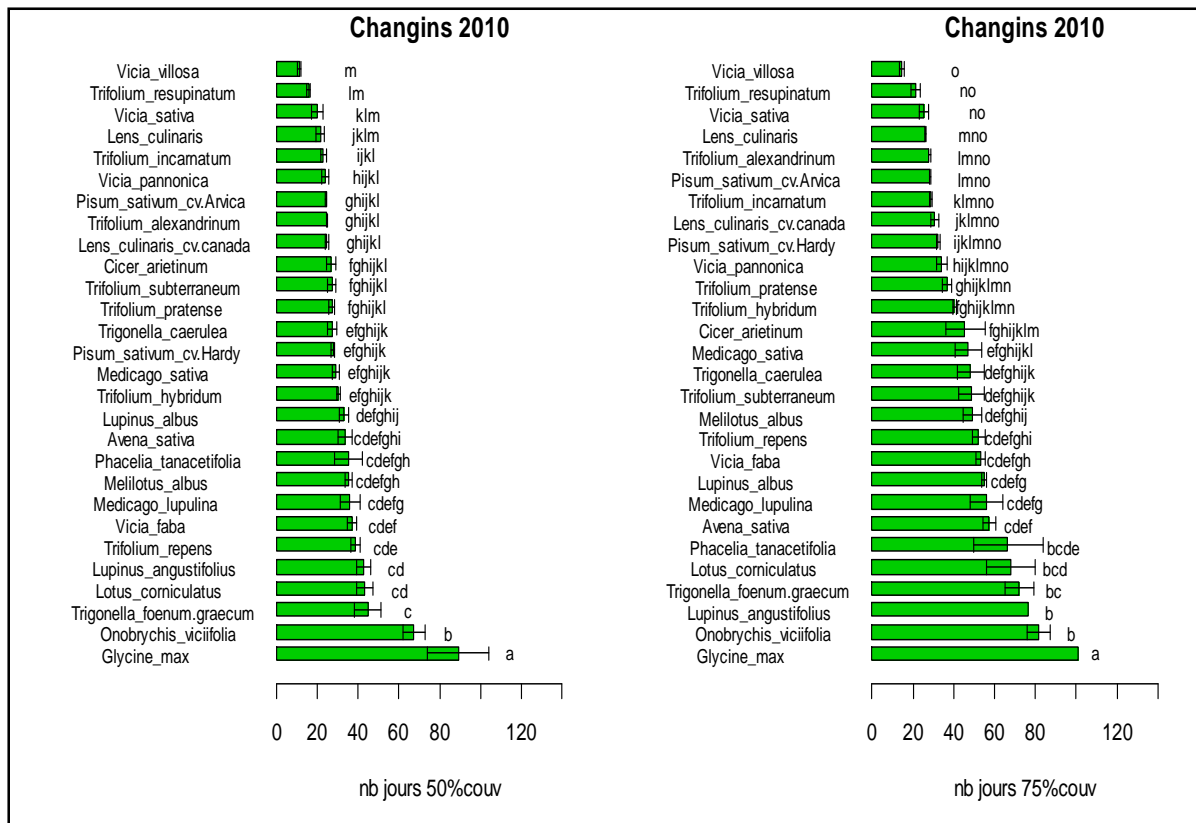


Figure 9: Nombre de jours nécessaires pour 50 et 75 % de couverture à Changins en 2010

Pour l'ensemble des 4 essais observés (2 essais à Zollkofen), les nombres de jours moyens pour atteindre 50% et 75% de couverture du sol ont été comparés par un test de Tukey (Annexe VIII) et sont résumés dans le Tableau 11 et le Tableau 12.

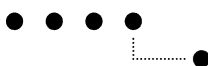


Tableau 11: Nombre de jours pour atteindre 50 % de couverture du sol par les plantes testées

Espèce	Changins*		Zollikofen*		Moyenne 4 essais	Ecart- type
	2010	2011	2011 VAT	2011 hivernant		
<i>Vicia villosa</i>	11 g	18 defgh	21 bcde	22 cdefgh	18	4.9
<i>Trifolium resupinatum</i>	16 fg	23 cdefgh	21 bcde	21 defgh	20	3
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	24 defg	16 h	20 bcde	20 efg	20	3.5
<i>Vicia sativa</i>	20 efg	18 fgh	23 abcd	22 cdefgh	21	2.2
<i>Lathyrus sativus</i>	NA ¹	19 defgh	22 bcde	23 cdefgh	21	1.9
<i>Lens culinaris</i>	21 efg	21 cdefgh	21 bcde	22 cdefgh	21	0.7
<i>Trifolium incarnatum</i>	23 efg	23 cdefgh	20 cde	21 efg	22	1.7
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	28 cdefg	17 fgh	21 bcde	22 cdefgh	22	4.4
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	35 cde	17 fgh	17 e	17 h	22	9
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	25 defg	20 cdefgh	23 abcd	23 cdefgh	23	2
<i>Lupinus albus</i>	33 cdef	18 fgh	21 bcde	20 fgh	23	6.8
<i>Trigonella caerulea</i>	27 cdefg	21 cdefgh	22 bcde	21 defgh	23	3
<i>Trifolium alexandrinum</i>	25 defg	22 cdefgh	23 abcd	24 cdefg	24	1.1
<i>Vicia pannonica</i>	24 defg	24 bcdefgh	23 abcd	25 bcdefg	24	0.8
<i>Cicer arietinum</i>	27 cdefg	18 efg	21 bcde	30 ab	24	5.4
<i>Avena sativa</i>	34 cdef	21 cdefgh	23 abcd	22 defgh	25	5.9
<i>Medicago sativa</i>	29 cdefg	27 bcdefg	22 abcde	21 defgh	25	3.7
<i>Trifolium pratense</i>	27 cdefg	29 bcd	22 bcde	25 bcdef	26	2.9
<i>Vicia faba</i>	37 cde	18 fgh	26 ab	23 cdefgh	26	7.9
<i>Trifolium hybridum</i>	30 cdefg	27 bcdef	25 ab	25 bcdefg	27	2.5
<i>Medicago lupulina</i>	36 cde	30 bc	21 bcde	21 defgh	27	7.4
<i>Trifolium subterraneum</i>	27 cdefg	34 b	24 abcd	24 bcdefg	27	4.7
<i>Trigonella foenum.graecum</i>	45 c	20 cdefgh	22 abcde	24 cdefg	28	11.4
<i>Melilotus albus</i>	35 cde	28 bcde	24 abcd	26 bcdef	28	5
<i>Lupinus angustifolius</i>	43 cd	26 bcdefgh	24 abcd	27 abcde	30	8.8
<i>Lotus corniculatus</i>	43 cd	NA ¹	25 ab	27 abcd	32	9.8
<i>Trifolium repens</i>	39 cde	54 a	25 abc	26 bcdef	36	13.5
<i>Glycine max</i>	89 a	17 gh	19 de	18 gh	36	35.6
<i>Onobrychis viciifolia</i>	68 b	49 a	27 a	28 abc	43	19.2

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)

¹Not available

Tableau 12: Nombre de jours pour atteindre 75 % de couverture du sol par les plantes testées

Espèce	Changins*		Zollikofen*			Moyenne 4 essais	Ecart-type
	2010	2011	2011 VAT		2011 hiv.		
<i>Vicia villosa</i>	15 i	28 ab	28	ab	28 bc	25	6.5
<i>Trifolium resupinatum</i>	21 hi	25 ab	25	ab	27 bc	25	2.2
<i>Trifolium incarnatum</i>	29 ghi	23 b	23	b	27 bc	26	2.8
<i>Lens culinaris</i>	27 ghi	26 ab	26	ab	29 bc	27	1.4
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	28 ghi	27 ab	27	ab	28 bc	28	0.8
<i>Vicia sativa</i>	26 ghi	29 ab	29	ab	28 bc	28	1.4
<i>Lathyrus sativus</i>	NA ¹	27 ab	27	ab	30 bc	28	1.8
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	33 ghi	27 ab	27	ab	29 bc	29	2.7
<i>Trifolium alexandrinum</i>	28 ghi	29 ab	29	ab	32 bc	30	1.8
<i>Vicia pannonica</i>	34 fgghi	28 ab	28	ab	31 bc	30	3
<i>Trifolium pratense</i>	37 efghi	27 ab	27	ab	33 bc	31	4.9
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	30 ghi	28 ab	28	ab	36 b	31	3.5
<i>Medicago sativa</i>	48 cdefghi	28 ab	28	ab	28 bc	33	9.8
<i>Trigonella caerulea</i>	48 bcdefghi	28 ab	28	ab	28 bc	33	10.1
<i>Medicago lupulina</i>	56 bcdefg	27 ab	27	ab	26 bc	34	14.6
<i>Lupinus albus</i>	55 bcdefgh	29 ab	29	ab	25 bc	34	13.9
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	67 bcdef	24 ab	24	ab	22 c	34	21.6
<i>Melilotus albus</i>	49 bcdefgh	29 ab	29	ab	31 bc	35	9.8
<i>Trifolium hybridum</i>	40 defghi	33 ab	33	ab	33 bc	35	3.8
<i>Trifolium subterraneum</i>	48 bcdefgh	32 ab	32	ab	32 bc	36	8.2
<i>Trifolium repens</i>	52 bcdefgh	31 ab	31	ab	33 bc	37	10.4
<i>Avena sativa</i>	57 bcdefg	32 ab	32	ab	31 bc	38	12.8
<i>Vicia faba</i>	53 bcdefgh	34 ab	34	ab	31 bc	38	10.1
<i>Cicer arietinum</i>	46 cdefghi	29 ab	29	ab	54 a	40	12.5
<i>Lotus corniculatus</i>	68 abcde	32 ab	32	ab	35 bc	41	17.7
<i>Trigonella foenum.graecum</i>	72 abcd	35 a	35	a	34 bc	44	18.6
<i>Glycine max</i>	101 a	25 ab	25	ab	24 bc	44	37.9
<i>Lupinus angustifolius</i>	77 abc	31 ab	31	ab	37 b	44	22.1
<i>Onobrychis viciifolia</i>	82 ab	34 ab	34	ab	36 b	47	23.4

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)
¹Not available

Les espèces couvrant le plus rapidement le sol (moins de 22 jours pour 50 % de couverture et moins de 29 jours pour 75 % de couverture) sont la vesce velue, le trèfle de Perse, le trèfle incarnat, la lentille, le pois, la vesce cultivée et la gesse. Parmi ces 7 espèces, seulement 4 se trouvent parmi celles qui ont le mieux inhibé la croissance de la biomasse des adventices (Tableau 15), ce qui indique encore que d'autres facteurs influent sur la capacité des espèces à inhiber les adventices. En 2010 à Changins, avec des conditions plutôt arides, des différences statistiquement fondées sont apparues.



En 2011 sous des conditions de croissance extrêmement favorables, aussi bien à Nyon qu'à Zollikofen, les vitesses de couverture du sol ne sont pas ou que peu différentes statistiquement entre elles pour la plupart des espèces: les courbes de croissances sont très verticales et présentent relativement peu de différences entre les espèces. C'est pourtant durant cette période cruciale de l'établissement de la biomasse de l'espèce concernée que l'effet de concurrence se joue et une observation plus fine de cette période est nécessaire pour bien caractériser les espèces. La même information est donnée par le calcul du taux de couverture su sol atteint à 45 et 90 jours. Le tableau résumant ces données figure en Annexe 4

4.4.1 Vitesse de couverture du sol et pouvoir de concurrence contre les adventices

La modélisation des dynamiques de croissance nous permet d'examiner la corrélation entre la vitesse d'établissement de la biomasse des plantes testées et la proportion d'adventice à la récolte. Cette corrélation a été testée sur le nombre de jours pour atteindre 50 et 75% de couverture du sol par les procédés ainsi que la couverture du sol atteinte à 45 et 90 jours (Annexe 5 et Annexe IX). La meilleure corrélation est obtenue avec le nombre de jour nécessaires pour atteindre 50% de couverture (pratiquement identique avec couverture atteinte à 45 jours). Pour cette corrélation, la pente de la régression est hautement significative. Pourtant le R^2 montre que la vitesse de couverture des plantes testées (jusqu'à 50% de couverture) n'explique seulement que 36.5% la variabilité de la proportion d'adventices à la récolte

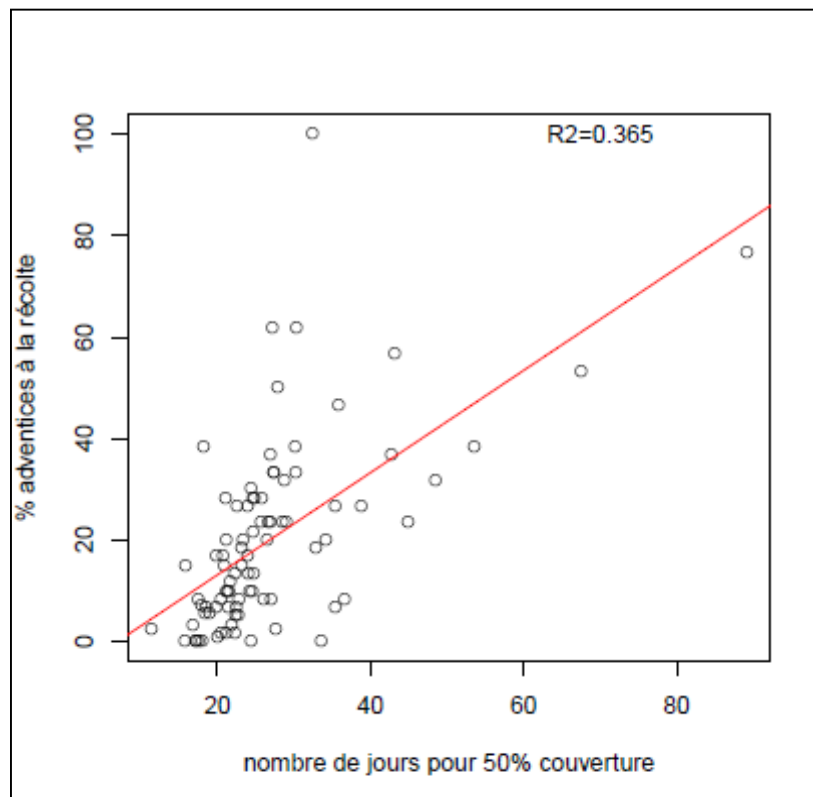


Figure 10: Corrélation entre vitesse de couverture et pouvoir de concurrence des adventices



Elle met bien en évidence que le pouvoir de concurrence des plantes testées vis-à-vis des adventices est fonction de plusieurs paramètres comme le relève Thorup-Kristensen et al. (2003) et qu'elle est encore mal connue. Ce graphique montre aussi qu'un taux de couverture du sol atteint en moins de 22 jours garantit très globalement une proportion d'adventice inférieur à 10 % en fin de cycle de végétation.

4.4.2 Capacité de concurrence des plantes testées vis-à-vis des plantes accompagnatrices

La capacité de concurrence en culture associée est exprimée par la proportion des légumineuses à la récolte dans les mélanges avec l'avoine ou la phacélie. La proportion de légumineuses au moment de la récolte a pu être observée visuellement dans les 3 expérimentations.

Ces données mises sont comparées avec un test de Duncan (Annexe X) et résumées dans le Tableau 13.

Les espèces les plus concurrentielles vis-à-vis de l'avoine sont en moyenne: les pois et les vesces y compris la fêverole. Les différences sont bien assurées statistiquement par rapport aux autres espèces, en particuliers en 2011. Les écarts-type sont particulièrement bas pour le pois Arvika et pour la fêverole indiquant une régularité du tait observé pour ces 2 espèces. La gesse (*Lathyrus sativus*) figure aussi parmi les espèces intéressantes avec une moyenne sur 2 essais à 66,7% de légumineuses dans le mélange si l'on fait abstraction de l'échec de germination en 2010.

Vis-à-vis de la phacélie, c'est à nouveau les pois et les vesces, qui en moyenne sont les plus concurrentielles. A ces espèces se joignent le lupin blanc. Les différences sont à nouveau beaucoup mieux assurées statistiquement en 2011, par des conditions « poussantes », permettant aux espèces d'exprimer leur potentiel pleinement. Les écart-types sont bas pour les pois, les vesces et le lupin indiquant une bonne régularité de leur capacité de concurrence vis-à-vis de la phacélie. Faisant abstraction de 2010, la gesse cultivée doit être considérée comme une des espèces les plus concurrentielles vis-à-vis de la phacélie avec une moyenne à 92,5%.



Tableau 13: Proportion de légumineuses à la récolte dans les mélanges avec avoine (%)

Espèces	Proportion de légumineuses dans mélanges avec avoine				
	Changins* 2010	Changins* 2011	Zollikofen* 2011	Moyenne 3 essais	Ecart- type
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	96.3 a	93.3 a	91.7 a	93.8	2.4
<i>Vicia sativa</i>	90.0 ab	53.3 c	88.3 ab	77.2	20.7
<i>Vicia villosa</i>	83.3 abcd	53.3 c	83.3 abc	73.3	17.3
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	86.7 abc	70.0 b	60.0 efg	72.2	13.5
<i>Vicia faba</i>	70.0 de	73.3 b	70.0 cde	71.1	1.9
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	76.7 bcd	23.3 ef	50.0 ghijk	50.0	26.7
<i>Lupinus albus</i>	36.7 hi	43.3 cd	70.0 cde	50.0	17.6
<i>Lens culinaris</i>	73.3 cd	11.7 fg	58.3 efgh	47.8	32.2
<i>Lathyrus sativus</i>	0.0 l	56.7 c	76.7 bcd	44.4	39.8
<i>Trifolium alexandrinum</i>	53.3 fg	20.0 efg	56.7 efgh	43.3	20.3
<i>Trifolium resupinatum</i>	56.7 ef	18.3 efgh	50.0 ghijk	41.7	20.5
<i>Glycine max</i>	6.7 l	56.7 c	60.0 efg	41.1	29.9
<i>Vicia pannonica</i>	56.7 ef	8.3 fg	58.3 efgh	41.1	28.4
<i>Trifolium incarnatum</i>	43.3 fgh	11.7 fg	66.7 def	40.6	27.6
<i>Melilotus albus</i>	26.7 ij	23.3 ef	53.3 fg	34.4	16.4
<i>Trigonella foenum graecum</i>	16.7 jkl	31.7 de	51.7 fghij	33.3	17.6
<i>Trifolium pratense</i>	40.0 ghi	10.0 fg	45.0 ghijkl	31.7	18.9
<i>Medicago sativa</i>	23.3 ijk	13.3 fg	58.3 efgh	31.7	23.6
<i>Trifolium hybridum</i>	26.7 ij	6.7 gh	40.0 ijklm	24.4	16.8
<i>Trifolium repens</i>	30.0 hij	6.0 gh	36.7 jklm	24.2	16.1
<i>Trifolium subterraneum</i>	10.0 kl	7.7 gh	50.0 ghijk	22.6	23.8
<i>Cicer arietinum</i>	30.0 hij	7.7 gh	26.7 mn	21.4	12.0
<i>Trigonella caerulea</i>	5.0 l	10.0 fg	43.3 hijkl	19.4	20.8
<i>Lupinus angustifolius</i>	13.3 jkl	8.3 fg	35.0 klm	18.9	14.2
<i>Medicago lupulina</i>	5.0 l	6.7 gh	33.3 lm	15.0	15.9
<i>Onobrychis viciifolia</i>	8.3 kl	6.0 gh	25.0 mn	13.1	10.4
<i>Lotus corniculatus</i>	5.0 l	3.0 hi	15.0 n	7.7	6.4
<i>Avena sativa</i>	0.0 l	0.0 i	0.0 o	0.0	0.0
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	0.0 l	0.0 i	0.0 o	0.0	0.0
<i>Sol nu</i>	0.0 l	0.0 i	0.0 o	0.0	0.0

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)



Tableau 14: Proportion de légumineuses à la récolte dans les mélanges avec phacélie(%)

Espèces	Changins* 2010	Changins* 2011	Zollikofen* 2011	Moyenne 3 essais	Ecart- type
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	97.7 a	95 a	95 a	95.9	1.5
<i>Vicia sativa</i>	95 ab	76.7	90	87.2	9.5
<i>Vicia faba</i>	81.7 abcde	93.3	83.3	86.1	6.3
<i>Vicia villosa</i>	88.3 abcd	80 b	86.7 a	85	4.4
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	91.7 abc	95 a	61.7 b	82.8	18.4
<i>Lathyrus sativus</i>	0 n	95 a	90 a	61.7	53.5
<i>Lupinus albus</i>	60 gh	50 c	58.3 bc	56.1	5.4
<i>Glycine max</i>	10 klmn	83.3 ab	63.3 b	52.2	37.9
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	46.7 hi	46.7 c	61.7 b	51.7	8.7
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	76.7 cdefg	6.7 fgh	56.7 bc	46.7	36.1
<i>Trifolium alexandrinum</i>	63.3 fgh	26.7 d	48.3 bcdef	46.1	18.4
<i>Trifolium resupinatum</i>	70 efg	13.3 efg	53.3 bcde	45.6	29.1
<i>Trifolium incarnatum</i>	63.3 fgh	23.3 de	48.3 bcdef	45	20.2
<i>Lens culinaris</i>	78.3 bcdef	7.7 fgh	46.7 bcdef	44.2	35.4
<i>Cicer arietinum</i>	76.7 cdefg	16.7 def	36.7 def	43.3	30.6
<i>Vicia pannonica</i>	73.3 defg	8.3 fgh	48.3 bcdef	43.3	32.8
<i>Trifolium pratense</i>	50 hi	3.7 gh	48.3 bcdef	34	26.3
<i>Trifolium subterraneum</i>	16.7 jklmn	5 fgh	63.3 b	28.3	30.9
<i>Trifolium repens</i>	46.7 hi	4.3 fgh	31.7 f	27.6	21.5
<i>Melilotus albus</i>	26.7 jk	11.7 fgh	40 cdef	26.1	14.2
<i>Medicago sativa</i>	20 jklm	8.3 fgh	48.3 bcdef	25.6	20.6
<i>Trifolium hybridum</i>	33.3 ij	6 fgh	33.3 f	24.2	15.8
<i>Trigonella caerulea</i>	8.3 lmn	8.3 fgh	55 bcd	23.9	26.9
<i>Lupinus angustifolius</i>	23.3 jkl	5 fgh	35 ef	21.1	15.1
<i>Medicago lupulina</i>	5 mn	5 fgh	41.7 cdef	17.2	21.2
<i>Onobrychis viciifolia</i>	8.3 lmn	5 fgh	36.7 def	16.7	17.4
<i>Lotus corniculatus</i>	5 mn	1 gh	15 g	7	7.2
<i>Avena sativa</i>	0 n	0 h	0 g	0	0
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	0 n	0 h	0 g	0	0
Sol nu	0 n	0 h	0 g	0	0

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)



4.4.3 Rendement des biomasses en mélange, expérimentation de Changins en 2010

En raison des conditions particulièrement sèches de la fin de l'été 2010 à Changins et du fait que nous disposons des données que d'un seul essai, aucune statistique n'est présentée sur ces résultats qui sont purement indicatifs.

Les mélanges avec l'avoine de printemps (variété Nelson) sont composés de la dose de semi normale, comme choisie pour l'expérimentation de la plante testée (chapitre 3.2) additionnée d'avoine à demi-dose (=66kg/ha).

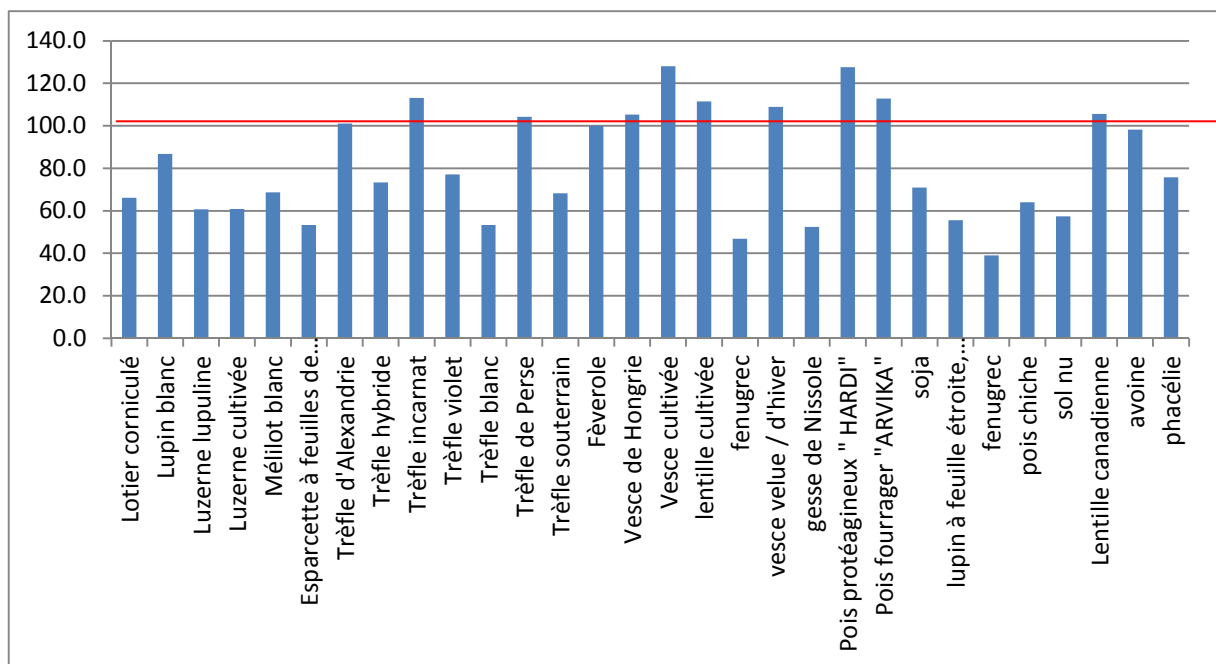


Figure 11: Rendement moyen du mélange des plantes testées avec l'avoine (%)

Globalement l'augmentation de la production de biomasse des mélanges est faible par rapport au rendement moyen de l'avoine semée pure à 140 kg/ha (40.3 q MS net/ha = 100%). Le pois fourrager ARVIKA et le trèfle incarnat atteignent 110%. Deux espèces en mélange dépassent 120% du rendement de l'avoine pure: la vesce cultivée et le pois protéagineux Hardy

Les mélanges avec la phacélie sont composés de la dose de semi normale, comme choisie pour l'expérimentation de la plante testée (chapitre 3.2) additionnée de phacélie à demi-dose (=5 kg/ha).

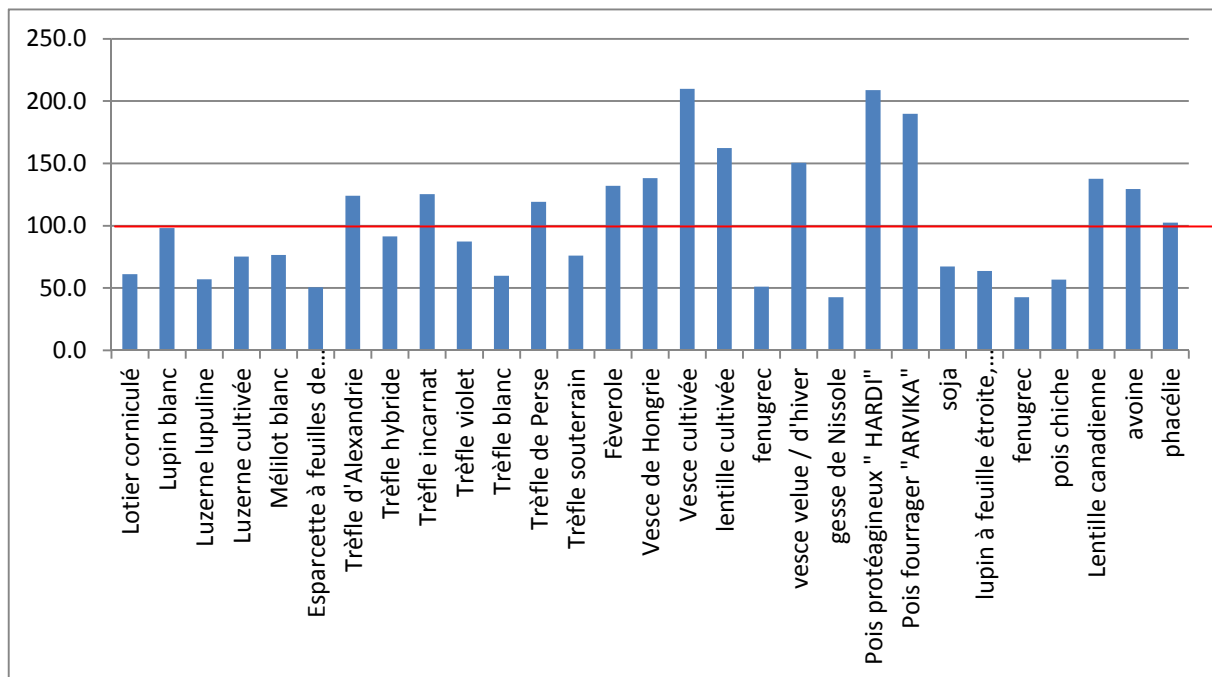


Figure 12: Rendement moyen du mélange des plantes testées avec la phacélie (%)

L'augmentation du rendement des mélanges avec phacélie sont nettement plus élevés qu'en mélange avec l'avoine. La vesce cultivée et le pois protéagineux permettent cette fois de doubler le rendement moyen en biomasse de la phacélie pure semée à pleine dose (26.2 q MS nette/ha = 100%). Le pois fourrager est aussi proche des 200%, alors que la lentille cultivée et la vesce velue sont proches de 150% d'augmentation de rendement. Cette augmentation importante des rendements en biomasse est à relativiser en raison du niveau relativement faible du rendement moyen de la phacélie en comparaison de ceux de l'avoine. Les rendements maximum des 2 meilleurs mélanges avec chacune des 2 espèces phacélie et avoine sont très proches (de l'ordre de 50 à 55 q. MS/ha) avec un léger avantage pour la phacélie. L'augmentation relativement élevée des rendements moyens en biomasse de mélanges par rapport à la phacélie seule, suggère que contrairement à l'avoine cette espèce n'exerce que peu ou pas de pression sur les autres espèces. Ce constat est aussi à mettre en relation avec le pouvoir de concurrence de la phacélie vis-à-vis des adventices comparé à celui de l'avoine.

4.5 Effet de concurrence des plantes testées vis-à-vis des adventices

Le rendement en biomasse des adventices est calculé en proportion de la biomasse brute récoltée (% biomasse adventices visuellement observé à la récolte). Ces valeurs sont donc indicatives et non exactes. Pratiquement il peut être directement calculé à partir des données de rendement des tableaux 7 et 8:

$$\begin{aligned} & \text{Biomasse brute (q MS brute/ha)} - \text{Biomasse nette (q MS nette/ha)} \\ & = \text{Biomasse des adventices (q MS/ha)} \end{aligned}$$

La flore adventice observée en 2010 à Changins était essentiellement composée d'amaranthes (*Amaranthus retroflexus*, *Amaranthus lividus*) et de chénopodes (*Chenopodium album*). A cette population s'ajoutaient irrégulièrement réparties, des espèces secondaires comme le raygrass (*Lolium sps.*), des repousses de blé (*Triticum aestivum*), le



pâturin commun (*Poa annua*), la renouée persicaire (*Polygonum persicaria*), le lamier rouge (*Lamium purpureum*), la capselle (*Capsella bursa-pastoris*), le laiteron rude (*Sonchus asper*). En 2011 à cette même flore s'est ajoutée une forte levée de colza (*Brassica napus*) aussi bien à Changins qu'à Zollikofen, hélas irrégulièrement répartie dans les 2 essais. A Zollikofen nous avons aussi observé une levée de stramoine commune (*Datura stramonium*) localisée dans l'essai hivernant. Les moyennes de la biomasse des adventices des 3 essais sont présentées dans le Tableau 15 sans analyse statistique, déjà faite sur les rendements en biomasse nette et brute (Tableau 9 et Tableau 10).

Tableau 15: Biomasse des adventices (q.MS/ha)

Espèces	Changins		Zollikofen	global
	2010	2011	2011	
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	0	0	0.48	0.16
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	1.3	0	1.53	0.94
<i>Vicia sativa</i>	0.37	2.58	0.75	1.23
<i>Vicia villosa</i>	1	1.87	2.04	1.64
<i>Lathyrus sativus</i>	2.03	2.43	1.55	2
<i>Avena sativa</i>	0	0.59	6.38	2.32
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	1.93	0	5.17	2.37
<i>Lupinus albus</i>	4.44	0	3.28	2.57
<i>Medicago sativa</i>	3.65	1.79	2.84	2.76
<i>Trigonella caerulea</i>	2.49	3.36	2.82	2.89
<i>Vicia faba</i>	3.72	0	5.75	3.16
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	2.58	3.75	3.65	3.33
<i>Glycine max</i>	6.85	1.41	2.53	3.6
<i>Trifolium alexandrinum</i>	4.62	2.25	5.75	4.2
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	3.6	3	6.31	4.3
<i>Melilotus albus</i>	3.59	5.25	4.93	4.59
<i>Lens culinaris</i>	4.51	4.74	5.05	4.77
<i>Trifolium subterraneum</i>	3.89	4.3	7.48	5.23
<i>Trifolium resupinatum</i>	6.21	7.8	2	5.34
<i>Cicer arietinum</i>	4.3	6.21	5.98	5.5
<i>Lupinus angustifolius</i>	6.06	3.57	6.87	5.5
<i>Trifolium repens</i>	4.4	6	6.23	5.54
<i>Vicia pannonica</i>	3.91	7.34	6.64	5.96
<i>Trifolium hybridum</i>	7.42	6.03	4.47	5.97
<i>Medicago lupulina</i>	4.44	6.84	6.75	6.01
<i>Trifolium incarnatum</i>	7.31	5.39	5.97	6.22
<i>Trifolium pratense</i>	6.44	6.27	6.67	6.46
<i>Lotus corniculatus</i>	5.08	8.2	8.71	7.33
<i>Onobrychis viciifolia</i>	7.93	6.25	11.06	8.41
<i>Sol nu</i>	9.04	7.19	13.25	9.83



Les sols nus ont produit de la biomasse adventice variant de 7 à 13 q. MS/ha. En moyenne des 3 essais, les adventices n'ont produit que < 2 q. MS/ha parmi les espèces à fort rendement, inhibant le mieux leur croissance: les 2 variétés de pois, les vesces de printemps et velue, la gesse cultivée et l'avoine.

Les espèces à faible développement sont les moins concurrentielles et dans ce cas la biomasse des adventices peut atteindre en moyenne de 6 à 8 q. MS /ha: esparcette, lotier corniculé, trèfle violet, trèfle incarnat, luzerne lupuline, trèfle hybride.

Cette corrélation entre quantité de biomasse produite et quantité d'adventices à la récolte peut être illustrée sous forme graphique. Le graphique suivant (Figure 13) est calculé sur la base de la proportion des adventices (%) dans la biomasse nette récoltée (Annexe XI).

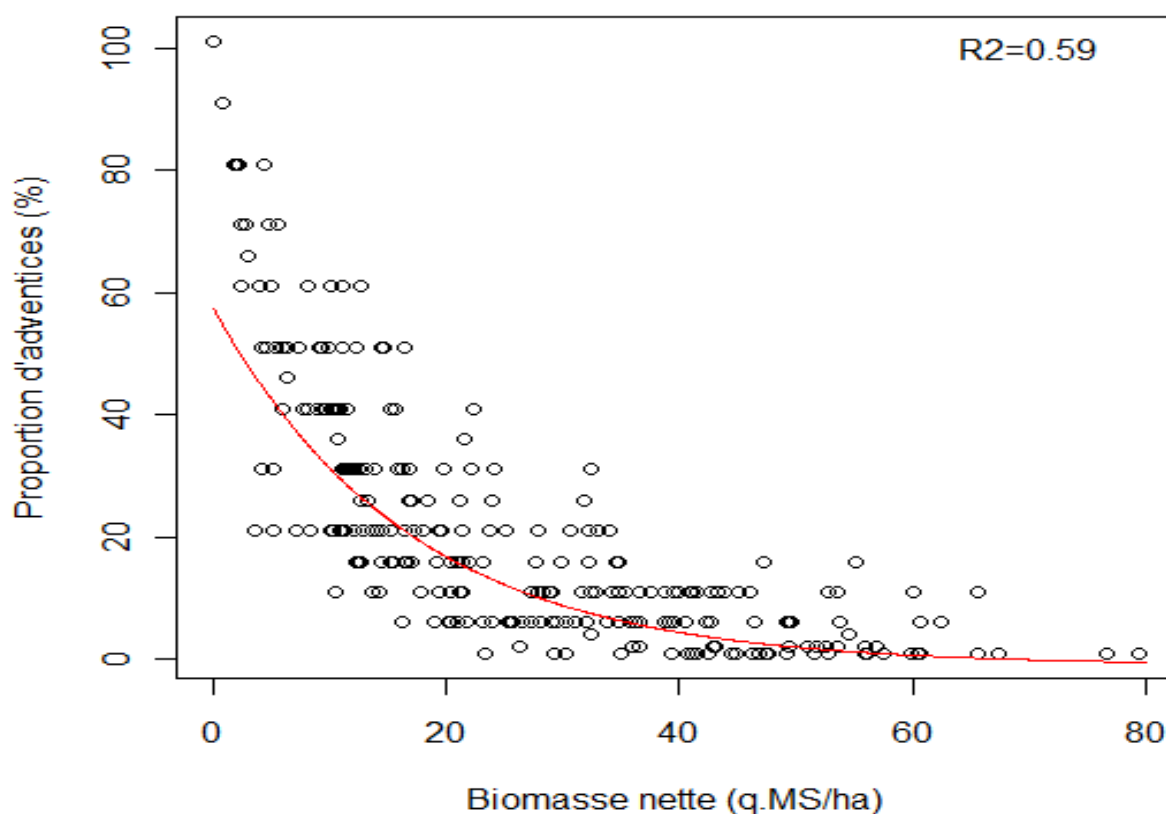


Figure 13: Corrélation entre la quantité de biomasse récoltée et la proportion d'adventices

Ce graphique est tracé sur la base des points (valeurs) réels. Mais l'analyse statistique de régression linéaire a été calculée sur le logarithme des valeurs +1 afin d'obtenir une droite

Cette analyse montre que la corrélation est hautement significative: p -value < $2.2e-16$ ($=2.2 \cdot 10^{-16}$).

La pente de la droite obtenue en transformant les valeurs en log est de -0.057 et l'intercept est de 3,967 hautement significatif ($p= 2.2 \cdot 10^{-16}$).

Le R^2 de 0,59 exprime que 59% de l'effet de concurrence contre les adventices peut être mise en relation avec la densité de la biomasse des plantes testées. Ce constat montre encore une fois que d'autres facteurs agissent parallèlement dans ce phénomène de concurrence vis-à-vis des adventices. Cette constatation confirme pourtant qu'un couvert



végétal suffisamment dense peut aussi contribuer à remplir l'objectif de concurrencer efficacement les adventices en sus de tous les autres services agro-environnementaux décrits par Bodmer (2010).

Ce graphique montre aussi que la capacité de concurrence des plantes testées a été généralement bonne (<10 % d'adventices) avec un rendement de l'ordre de 30 à 40 q. MS/ha. Cet ordre d'idée de rendement en biomasse peut donc être proposé, d'une manière générale, comme la cible minimale à viser pour un couvert végétal efficace en termes de concurrence des adventices dans les conditions de nos essais.

4.5.1 Développement spatial des biomasses

Exprimant la quantité de biomasse formée, la hauteur du peuplement en fin de végétation est un des facteurs qui détermine la capacité des espèces à concurrencer les adventices grâce à l'occupation de l'espace vertical. C'est particulièrement le cas pour la fève, la phacélie, l'avoine, le lupin blanc et dans une moindre mesure pour le trèfle d'Alexandrie.



Figure 14: Des hauteurs très différentes

Ces différences de hauteurs peuvent être traduites dans une représentation graphique (Figure 15).

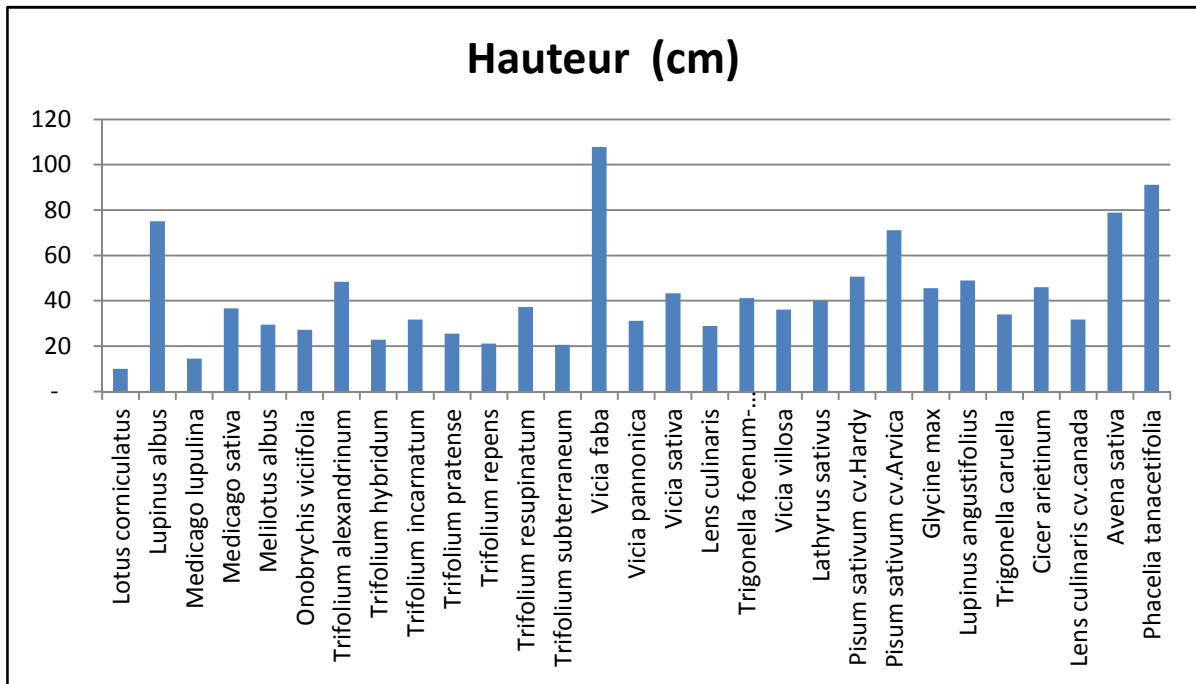


Figure 15: Hauteur moyenne des plantes testées à la récolte (moyennes de 3 essais)

5 espèces se distinguent en hauteur ; la fêverole, la phacélie, l'avoine, le lupin blanc et le pois ARVIKA. Certaines espèces ont inhibé fortement les adventices sans pour autant s'être développées en hauteur mais plutôt dans l'espace horizontal (épaisseur et densité du couvert végétal). C'est le cas de la vesce de printemps, de la vesce velue, de la gesse et de la lentille.

Comme le montre l'analyse de corrélation précédente, le développement des adventices est aussi influencé conjointement par d'autres facteurs comme l'allélopathie propre à l'espèce testée et qui n'est pas prise en compte dans ce travail. Ce thème fait l'objet de tests séparés à Agroscope Changins (travail de Judith Wirth). La vitesse d'établissement des plantes testées est aussi un des facteurs important qui influence le développement des adventices dans le couvert végétal, grâce à la pression de concurrence pour la lumière, l'eau et les nutriments (chapitre 4.4.1)

4.6 Azote total contenu dans la biomasse aérienne

La concentration en azote total (Kjeldal) a été analysée sur les biomasses des 22 espèces sélectionnées par le laboratoire Sol-conseil à Nyon (Annexe III). Ces concentrations nous permettent de calculer la quantité d'azote contenu dans la biomasse aérienne de chaque espèce.



Tableau 16: Quantité d'azote total moyenne dans la biomasse aérienne des plantes testées (kg/ha)

Espèces	Changins*		Changins*		Zollikofen*		Moyenne 3 essais	Ecart-type
	2010		2011		2011			
<i>Cicer arietinum</i>	31.7	efg	22	g	9.1	j	20.9	11.3
<i>Trigonella caerulea</i>	10	g	21.4	g	36.5	i	22.7	13.3
<i>Trifolium repens</i>	34.6	efg	36.4	fg	58.1	fghi	43	13
<i>Melilotus albus</i>	33.1	efg	52.2	efg	55.1	fghi	46.8	12
<i>Trifolium subterraneum</i>	39.3	ef	58.6	defg	43.1	hi	47	10.2
<i>Trifolium pratense</i>	41.9	ef	47.2	efg	54.4	ghi	47.9	6.3
<i>Avena sativa</i>	41.3	ef	37.5	fg	68.2	efgh	49	16.7
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	24.9	fg	89.8	de	33.4	ij	49.4	35.3
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	33.5	efg	55	defg	73.9	efg	54.1	20.2
<i>Medicago sativa</i>	36.5	efg	59.6	defg	83.5	defg	59.9	23.5
<i>Lupinus albus</i>	58.9	e	88.2	def	58.8	fghi	68.6	17
<i>Glycine max</i>	21.2	fg	142.8	bc	59.8	fghi	74.6	62.2
<i>Trifolium alexandrinum</i>	83.2	d	76	def	80.9	defg	80	3.7
<i>Trifolium resupinatum</i>	111.2	c	61.8	defg	85.1	def	86.1	24.7
<i>Trifolium incarnatum</i>	107.8	c	104.8	cd	90.1	de	100.9	9.5
<i>Vicia pannonica</i>	143.4	b	79.8	def	96.5	de	106.5	33
<i>Lens culinaris</i>	144.8	b	67.3	defg	108.3	cd	106.8	38.8
<i>Lathyrus sativus</i>	NA ¹		161.1	ab	129.1	bc	145.1	22.6
<i>Pisum sativum cv Hardy</i>	147.3	b	165.9	ab	139	b	150.8	13.8
<i>Vicia villosa</i>	200.4	a	159	ab	134.6	bc	164.7	33.3
<i>Vicia faba</i>	126.6	bc	203.9	a	168.6	a	166.4	38.7
<i>Vicia sativa</i>	194.6	a	143.3	bc	175.8	a	171.2	26

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)
¹Not available

En moyenne des 3 essais, 8 espèces contiennent plus de 100 kg d'azote dans leur biomasse aérienne avec des pics à plus de 150 kg pour la vesce cultivée, la fêverole, la vesce velue et le pois. Ces valeurs sont statistiquement bien assurées et relativement stables. Les 2 plantes non fixatrices ont absorbé entre 49 et 54 kg d'azote.

Selon les résultats des analyses de biomasses (Annexe III), la concentration en azote dans la MS varie de l'ordre de 1.2 % pour la phacélie et l'avoine à plus de 4 % pour les vesces et la gesse. Les espèces produisant le plus d'azote par unité de surface (> 100 kg/ha) ont donc un rendement de biomasse important doublé d'une teneur en azote élevée.



Une juxtaposition de la quantité d'azote totale contenue dans les biomasses aériennes (en rouge) et la quantité de biomasse produite par ha (en bleu) pour les espèces précédemment mentionnées (contenant plus de 100 kg/ha) ainsi que pour le lupin blanc et les 2 espèces de référence est illustrée dans la Figure 16:

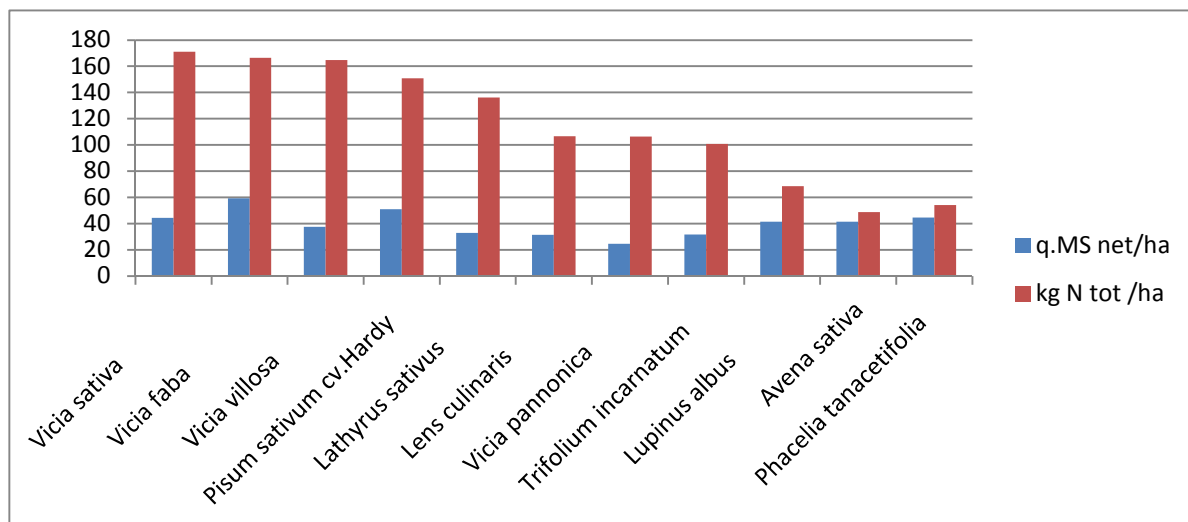


Figure 16: Biomasse aérienne produite (q.MS net /ha) et leur teneur totale en azote (Kg N tot /ha) pour quelques espèces

Les légumineuses fixatrices d'azote atmosphérique présentent un rapport large, alors que les espèces de référence (avoine et phacélie) présentent un rapport étroit.

Le lupin blanc montre aussi un rapport relativement étroit entre la quantité de MS nette produite par ha et la quantité d'azote totale de cette dernière. Ce constat laisse à penser que cette espèce n'a pas eu une fixation biologique importante dans les conditions de nos essais, probablement par manque d'innoculum adéquat dans les sols (Herrige op. 2008).

Le tableau suivant est basé sur l'analyse de l'azote minéralisé (Nmin) dans le sol des micro-parcelles de fèverolle (166 kg N total en moyenne dans la biomasse aérienne) et de phacélie (54 kg N total en moyenne dans la biomasse aérienne). Les échantillons de sol ont été prélevés en 2011, sitôt après la récolte des 2 essais. Les résultats (Annexe II) résumés dans le Tableau 17, suggèrent que de fortes productions d'azote par la biomasse aérienne sont probablement aussi un indice d'une production importante dans le sol : les reliquats d'azote minéralisé sont en moyenne le double dans les sols où a poussé la légumineuse.

Tableau 17: Teneur en Nmin.(kg/ha) des parcelles Fèverolle et Phacélie en 2011

Nmin (kg N/ha), prélèvement 0-30 cm			Fèverolle	Phacélie
Zollikofen	Aviforum	15.11.2011	56	28
Changins	Parcelle 8	15.11.2011	44	22



4.7 Azote biologiquement fixé

L'azote total contenu dans la biomasse des légumineuses provient d'une part de la solution du sol et d'autre part de la fixation biologique par la symbiose microbienne (nutrition azotée mixte). Une part variable de l'azote total, contenu dans la biomasse aérienne des légumineuses récoltées, provient de la fixation biologique.

Cette part est variable d'une espèce à l'autre. Afin de déterminer cette part d'azote dérivée de l'atmosphère (%Ndfa), nous appliquons la méthode de l'abondance naturelle de l'isotope N¹⁵ selon Unkovich et al. (2008).

4.7.1 Valeurs Beta des 22 espèces retenues

L'expérimentation menée en pots sous abri à Zollikofen a permis de déterminer les valeurs Beta pour nos 22 espèces et nos conditions d'expérimentation (Annexe IV et V).

Tableau 18: Valeurs Beta (moyennes de 3 répétitions)

Espèces		Espèces	
<i>Lupinus albus</i>	-0.74	<i>Vicia sativa</i>	-1.09
<i>Medicago sativa</i>	-0.79	<i>Lens culinaris</i>	-1.18
<i>Melilotus albus</i>	-0.91	<i>Trigonella foenum-graecum</i>	-0.42
<i>Trifolium alexandrinum</i>	-1.11	<i>Vicia villosa</i>	-0.35
<i>Trifolium incarnatum</i>	-0.67	<i>Lathyrus sativus</i>	-0.54
<i>Trifolium pratense</i>	-0.83	<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	-0.56
<i>Trifolium repens</i>	-0.53	<i>Glycine max</i>	-1.46
<i>Trifolium resupinatum</i>	-0.81	<i>Trigonella caerulea</i>	0.94
<i>Trifolium subterraneum</i>	-0.81	<i>Cicer arietinum</i>	-2.60
<i>Vicia faba</i>	-0.08	<i>Avena sativa</i>	0.77
<i>Vicia pannonica</i>	-0.14	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	1.76

Ces valeurs Beta (Tableau 18) servent à l'application de la formule de calcul du % Ndfa de façon à corriger la différence naturelle de concentration de l'azote N¹⁵ entre la biomasse aérienne et la biomasse souterraine des légumineuses (chapitre 3.2).

Selon Unkovich et al (2008), les valeurs Beta sont généralement comprises entre 0 et -1 pour les légumineuses de climat tempéré, à l'exception du pois chiche et du trèfle blanc. Nos valeurs correspondent au standard décrit par Unkovich (2008) à l'exception du trèfle blanc (*trifolium repens*) qui se situe nettement au-dessus de -1 et la trigonelle bleue (*trigonella caerulea*) qui est positive à 0,94. Pour cette dernière espèce, l'explication la plus plausible est que l'infection bactérienne n'a pas eu lieu et donc la légumineuse n'a pas pu fixer d'azote atmosphérique.



4.7.2 Quantité d'azote dérivé de l'atmosphère

L'azote dérivé de l'atmosphère est exprimé en % Ndfa de l'azote total. Ces données sont calculées à l'aide de la formule d'Unkovich et al. (2008) sur la bases des résultats d'analyse N^{15} du laboratoire Isolab (Annexe IV) :

$$\%Ndfa = \frac{\delta^{15}N \text{ de la plante de référence} - \delta^{15}N \text{ de la légumineuse fixatrice de } N_2}{\delta^{15}N \text{ de la plante de référence} - B} \times \frac{100}{1}$$

Le calcul a été fait pour chaque légumineuse testée une première fois en prenant la phacélie comme plante de référence et une seconde fois en prenant l'avoine. Le %Ndfa final est la moyenne des 2 résultats. Le détail de ces calculs figure en Annexe VI.

Les résultats calculés par un test de Duncan (Tableau 19) sont parfois au-dessus de 100% (dans 2 cas : Changins 2011) ou encore non nuls ou négatifs pour les espèces non fixatrices comme l'avoine. Cette situation est théoriquement expliquée par le manque de précision de la méthode NA qui n'exprime qu'une estimation de l'azote biologiquement fixé (Chapitre 3.7).

A ce stade de l'étude, afin de dissiper les doutes sur la qualité de nos données en azote, il a été nécessaire de les tester encore de manière critique. Une étude de corrélation a révélé une étroite corrélation ($R^2=0.99$) entre les teneurs en azote total de nos biomasses, analysées par le laboratoire Sol-Conseil (Kjeldal) et celles calculées par Isolab (specromètre de masse), ce qui démontre la solidité de ces données.



Tableau 19: Pourcent d'azote dérivé de l'atmosphère par les plantes testées.

Espèces	Changins*		Changins*		Zollikofen*	Moyenne	Ecart-type	
	2010		2011		2011	3 essais		
<i>Trigonella caerulea</i>	11.4	r	-116.7	v	-2.2	u	-35.8	70.4
<i>Avena sativa</i>	8.8	s	22.6	t	9.4	s	13.6	7.8
<i>Cicer arietinum</i>	13.9	q	10.5	u	19.1	p	14.5	4.4
<i>Glycine max</i>	35.3	p	31.3	r	2.6	t	23.1	17.8
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	51.1	n	31.2	s	19.0	q	33.7	16.2
<i>Lupinus albus</i>	58.0	k	45.2	p	16.3	r	39.8	21.3
<i>Trifolium subterraneum</i>	54.2	l	73.1	l	36.6	o	54.6	18.3
<i>Melilotus albus</i>	42.4	o	59.2	n	64.1	m	55.2	11.4
<i>Medicago sativa</i>	53.3	m	42.3	q	74.5	h	56.7	16.3
<i>Trifolium alexandrinum</i>	71.5	h	47.7	o	72.6	k	63.9	14.1
<i>Trifolium pratense</i>	66.3	i	76.9	i	68.8	l	70.7	5.5
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	74.2	e	69.9	m	73.0	j	72.4	2.2
<i>Lens culinaris</i>	72.2	g	74.4	k	74.7	f	73.8	1.3
<i>Vicia sativa</i>	73.3	f	76.1	j	74.6	g	74.7	1.4
<i>Trifolium incarnatum</i>	72.1	g	93.3	e	64.0	n	76.5	15.2
<i>Trifolium repens</i>	64.5	j	88.2	g	80.2	a	77.6	12.0
<i>Trifolium resupinatum</i>	77.0	d	92.4	f	75.8	e	81.7	9.3
<i>Vicia faba</i>	88.9	a	85.9	h	77.5	b	84.1	5.9
<i>Lathyrus sativus</i>	NA		94.6	d	76.4	d	85.5	12.9
<i>Vicia villosa</i>	87.3	b	107.3	c	74.4	i	89.7	16.6
<i>Vicia pannonica</i>	81.4	c	112.2	b	77.5	c	90.3	19.0

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)

Certaines espèces ne fixent peu ou pas d'azote, probablement par manque d'inoculum : la trigonelle bleue, le pois chiche, le fenugrec et le soja. Les % Ndfa sont globalement plutôt élevés avec un maximum de 90 % pour la meilleure espèce en moyenne des 3 essais. Sur l'ensemble des espèces testées 15 se situent en dessus de 50 % d'azote dérivé de l'atmosphère avec des écarts-type bas indiquant une bonne régularité.



Tableau 20: Quantité d'azote dérivé de l'atmosphère

Azote dérivé de l'atmosphère (kgNdfa/ha)								
Espèces	Changins* 2010		Changins* 2011		Zollikofen* 2011		Moyenne 3 essais	Ecart- type
<i>Trigonella caerulea</i>	1.1	ij	-25.0	h	-0.8	gh	-8.2	14.5
<i>Cicer arietinum</i>	4.4	hij	2.3	h	1.7	gh	2.8	1.4
<i>Avena sativa</i>	3.6	hij	8.5	gh	6.4	g	6.2	2.4
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	12.7	ghi	28.0	efgh	6.3	g	15.7	11.1
<i>Glycine max</i>	7.5	hij	44.7	defgh	1.6	gh	17.9	23.4
<i>Trifolium subterraneum</i>	21.3	fgh	42.9	defgh	15.8	g	26.6	14.3
<i>Melilotus albus</i>	14.0	ghi	30.9	efgh	35.3	f	26.7	11.2
<i>Lupinus albus</i>	34.1	f	39.9	defgh	9.6	g	27.9	16.1
<i>Trifolium repens</i>	22.3	fgh	32.1	efgh	46.5	ef	33.7	12.2
<i>Trifolium pratense</i>	27.8	fg	36.3	defgh	37.5	f	33.9	5.3
<i>Medicago sativa</i>	19.5	fghi	25.2	fgh	62.2	de	35.6	23.2
<i>Trifolium alexandrinum</i>	59.5	e	36.3	defgh	58.7	de	51.5	13.2
<i>Trifolium resupinatum</i>	85.6	d	57.1	defgh	64.5	cde	69.1	14.8
<i>Trifolium incarnatum</i>	77.7	d	97.9	bcdef	57.6	de	77.7	20.1
<i>Lens culinaris</i>	104.6	c	50.0	defgh	80.9	c	78.5	27.4
<i>Vicia pannonica</i>	116.8	c	89.5	cdefg	74.7	cd	93.6	21.3
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	109.3	c	116.1	bcd	101.5	b	109.0	7.3
<i>Lathyrus sativus</i>	Na		152.4	bc	98.6	b	125.5	38.0
<i>Vicia sativa</i>	142.6	b	109.1	bcde	131.0	a	127.6	17.0
<i>Vicia faba</i>	112.6	c	175.1	b	130.6	a	139.4	32.2
<i>Vicia villosa</i>	175.0	a	170.6	b	100.1	b	148.6	42.0

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)
¹Not available

Les quantités globales sont aussi relativement élevées pour le quartile supérieur. Il faut toutefois garder en tête le niveau de précision de la méthode NA. La stabilité du rendement en azote fixé est plutôt assez élevée pour l'ensemble des valeurs.

Dans la biomasse aérienne des 5 meilleures espèces, **il est possible de fixer de 109 à 148 kg d'azote en trois mois de végétation, dans le climat du plateau Suisse !**

Pour ces 5 espèces l'azote non symbiotique absorbé du sol varie entre 16 kg/ha pour la vesce velue et 44 kg/ha pour la vesce cultivée ce qui est assez proche de l'azote absorbé par l'avoine : 49 kg/ha et la phacélie : 54 kg/ha (Tableau 16). C'est donc bien la fixation biologique qui fait la différence.

Nos valeurs comparées à celle citées par Peoples et al (1995) se situent dans les valeurs inférieures pour le pois chiche, le lupin et le soja ce qui indique encore que ces espèces n'ont pas rencontré leur partenaire symbiotique dans nos terres. Par contre la comparaison pour la fèverole, le pois et la lentille se situent dans la moyenne des intervalles de valeurs cités par ces auteurs, ce qui semble normal compte tenu de la relativement courte période de végétation disponible.



Les quantités d'azote atmosphérique qu'il est possible de fixer en 3 mois avec les meilleures espèces de légumineuses testées dans les conditions de nos essais, nous permettent d'affirmer **qu'un potentiel très important existe dans cette voie.**

En considérant que ces quantités sont pratiquement doublées par la biomasse souterraine et un taux de transfert moyen de l'ordre de 40 %, comme estimé par l'étude de littérature, des quantités de l'ordre de 100 kg d'azote dérivés de l'atmosphère ont théoriquement été mises à disposition des plantes accompagnatrices par ces espèces dans les conditions de nos essais.

4.8 Quantités de nutriments principaux dans les biomasses

Les analyses des nutriments ont été faites par le laboratoire Sol-conseil sur le mélange homogène des biomasses des 3 répétitions groupées pour chaque expérimentation (Annexe III). Les résultats sont calculés à l'aide de tests de Duncan (Annexe IX).

Les concentrations en Ca et Mg n'ont pas été analysées en 2010.

Les quantités de nutriments exprimées en kg/ha ont aussi été calculées sur la base de la biomasse brute en 2010 et sur la base de la biomasse nette en 2011. Comme pour l'azote, les valeurs expriment les quantités d'éléments nutritifs contenus dans la biomasse aérienne et ne dit rien des quantités contenues dans la biomasse souterraine.



4.8.1 Phosphore (P)

Tableau 21: Quantités moyennes de Phosphore dans la biomasse aérienne (kg P/ha)

Espèces	Changins*		Zollikofen*	Moyenne 3 essais	Ecart- type
	2010	2011	2011		
<i>Melilotus albus</i>	3.9 jkl	3.5 k	4.7 jkl	4	0.6
<i>Trifolium pratense</i>	4.4 jkl	3.6 k	4.3 kl	4	0.4
<i>Trifolium repens</i>	4.9 jkl	3.2 k	4.9 jkl	4	1
<i>Trigonella caerulea</i>	2 l	5.3 ijk	6.2 ijk	4	2.2
<i>Cicer arietinum</i>	7.2 ghij	5 ijk	1.7 l	5	2.8
<i>Trifolium subterraneum</i>	4.4 jkl	4.7 jk	4.9 jkl	5	0.2
<i>Medicago sativa</i>	3.6 kl	5 ijk	6.8 hijk	5	1.6
<i>Trifolium alexandrinum</i>	6.6 hijk	6.3 ijk	7.7 ghij	7	0.7
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	5.4 ijkl	13.4 ef	8.1 fgghi	9	4
<i>Trifolium resupinatum</i>	10.7 def	7.3 hijk	10.6 defg	10	1.9
<i>Vicia pannonica</i>	13 bcde	8.4 ghij	9.6 efgh	10	2.4
<i>Trifolium incarnatum</i>	10.9 def	11.3 fgh	11.1 cdef	11	0.2
<i>Glycine max</i>	3 l	18.9 abc	12.2 cde	11	8
<i>Avena sativa</i>	10.5 defg	11.6 fg	14.4 bc	12	2
<i>Lens culinaris</i>	15.7 b	9 ghi	13 cd	13	3.3
<i>Lathyrus sativus</i>	NA ¹	13.9 def	12.6 cde	13	0.9
<i>Lupinus albus</i>	8.6 fgghi	20 ab	13.5 cd	14	5.7
<i>Vicia villosa</i>	14.4 bc	15.8 cde	12.6 cde	14	1.6
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	9.7 efgh	17 bcde	17.3 ab	15	4.3
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	13.9 bcd	17.9 abcd	13.6 cd	15	2.4
<i>Vicia faba</i>	11.7 cdef	21.4 a	17.3 ab	17	4.9
<i>Vicia sativa</i>	22.6 a	16 bcde	19.1 a	19	3.3

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)
¹NA = Non Available

Globalement la quantité de phosphore exportée par les espèces testées est relativement modeste (Tableau 21). Les exportations sont stables (peu de variation) pour toutes les espèces. La plus grande exportation de phosphore (14 -19 kg P/ha) est obtenue par quelques espèces à forte production de biomasse : Vesce de printemps, fèverole mais aussi pois, phacélie, vesce velue et lupin blanc.

A l'exception de la phacélie non fixatrice et du lupin blanc qui n'a fixé que 28 kg d'azote par ha en moyenne de nos essais (Tableau 20), les espèces exportant le plus de phosphore sont aussi parmi celles qui fixent le mieux l'azote atmosphérique ce qui est logique car elles développent plus de biomasse. Ce constat indique donc aussi que le lupin blanc et la phacélie sont des espèces particulièrement intéressantes pour recycler du phosphore.



Le melilot blanc, la luzerne et la plupart des trèfles exportent peu de phosphore (sur la première coupe d'automne) à l'exception du trèfle d'Alexandrie, du trèfle de Perse et du trèfle incarnat.

4.8.2 Potassium (K)

Tableau 22: Quantités moyennes de Potassium dans la biomasse aérienne (kg K/ha)

Quantités moyennes de Potassium dans la biomasse aérienne (kg/ha)								
Espèces	Changins* 2010		Changins* 2011		Zollikofen* 2011	Moyenne 3 essais	Ecart- type	
<i>Trifolium repens</i>	42	hi	29	g	40	h	37	7.0
<i>Cicer arietinum</i>	73	efg	29	g	11	i	38	32.0
<i>Trifolium subterraneum</i>	37	hi	44	fg	43	h	41	3.7
<i>Melilotus albus</i>	38	hi	45	fg	45	gh	43	4.1
<i>Trifolium pratense</i>	51	fghi	36	g	43	h	43	7.7
<i>Medicago sativa</i>	46	ghi	50	fg	49	fgh	48	2.2
<i>Trigonella caerulea</i>	22	i	55	efg	73	def	50	25.9
<i>Glycine max</i>	22	i	82	cde	48	fgh	50	29.9
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	39	hi	110	bc	50	fgh	67	38.4
<i>Trifolium alexandrinum</i>	87	de	68	ef	70	efg	75	10.3
<i>Lens culinaris</i>	117	bc	54	efg	82	cde	84	31.5
<i>Vicia pannonica</i>	130	b	66	ef	63	efgh	87	37.7
<i>Lathyrus sativus</i>	NA ¹		99	cd	76	cde	88	15.9
<i>Avena sativa</i>	91	cde	69	ef	109	b	90	19.8
<i>Lupinus albus</i>	67	efgh	108	bc	97	bcd	91	21.4
<i>Trifolium resupinatum</i>	126	b	72	def	79	cde	92	29.2
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	116	bcd	101	bc	88	bcde	102	14.0
<i>Vicia villosa</i>	124	b	109	bc	89	bcde	107	17.9
<i>Trifolium incarnatum</i>	115	bcd	112	bc	101	bc	110	7.2
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	79	ef	130	b	156	a	122	39.3
<i>Vicia sativa</i>	199	a	109	bc	133	a	147	46.7
<i>Vicia faba</i>	123	b	187	a	135	a	148	33.9

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)
¹Not available

Les quantités de potassium exportées sont globalement plus élevées, elles varient de 37 à 50 kg K/ha pour les biomasses en contenant le moins à près de 150 kg K/ha pour les 2 espèces en exportant le plus : la vesce de printemps et la fèverole. Les écarts types généralement élevés montrent une variabilité des exportations en potassium. (Tableau 22).



Globalement, ce sont à nouveau les espèces fixant le mieux l'azote qui exportent le plus, à l'exception de la phacélie qui démontre sa capacité à recycler aussi le potassium.

4.8.3 Calcium (Ca)

Pour le calcium les données ne sont disponibles que pour 2011.

Tableau 23: Quantités moyennes de Calcium dans la biomasse aérienne (kg Ca/ha)

Espèces	Changins*		Zollikofen*		Moyenne 2 essais	Ecart-type
<i>Cicer arietinum</i>	13	ijk	4	l	9	5.8
<i>Trifolium repens</i>	10	jk	14	kl	12	2.2
<i>Avena sativa</i>	9	k	15	jkl	12	4.6
<i>Vicia pannonica</i>	16	hijk	15	jkl	16	0.7
<i>Lens culinaris</i>	15	hijk	29	fghij	22	9.4
<i>Trifolium pratense</i>	22	ghijk	23	ghijk	23	0.8
<i>Melilotus albus</i>	24	fghij	22	hijk	23	1.4
<i>Lathyrus sativus</i>	27	fghi	21	ijk	24	4.3
<i>Trifolium subterraneum</i>	28	fghi	25	ghijk	26	2.1
<i>Vicia villosa</i>	29	fgh	26	fghijk	27	2.4
<i>Trifolium resupinatum</i>	26	fghi	30	efghi	28	2.4
<i>Trifolium incarnatum</i>	29	fgh	30	efghi	29	0.5
<i>Trigonella caerulea</i>	29	fgh	39	def	34	6.8
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	39	ef	29	fghij	34	7.3
<i>Medicago sativa</i>	36	efg	36	efgh	36	0.1
<i>Vicia sativa</i>	36	efg	43	cde	39	4.5
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	47	de	36	efg	42	7.7
<i>Vicia faba</i>	49	cde	54	c	51	4
<i>Lupinus albus</i>	62	bc	43	cde	52	13.3
<i>Glycine max</i>	60	bcd	51	cd	56	6.8
<i>Trifolium alexandrinum</i>	63	b	74	b	69	7.9
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	128	a	163	a	146	24.9

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)

Comme pour le potassium, les quantités de calcium exportées sont globalement relativement élevées (Tableau 23). En moyenne des 2 expérimentations, la phacélie (146 kg Ca /ha) et le trèfle d'Alexandrie (69 kg Ca/ha) se distinguent très significativement l'une de l'autre et de toutes les autres espèces. Ces 2 espèces profitent certainement d'un pH alcalin, ce qui était le cas des sols de nos expérimentations en 2011. La phacélie confirme encore sa grande capacité de recyclage des éléments nutritifs principaux.



4.8.4 Magnésium (Mg)

Pour le magnésium les données ne sont disponibles que pour 2011.

Tableau 24: Quantités moyennes de Magnésium dans la biomasse aérienne (kg Mg/ha)

Espèces	Changins*	Zollikofen*	Moyenne 2 essais	Ecart-type
<i>Cicer arietinum</i>	1.8 l	0.7 j	1.2	0.8
<i>Trifolium repens</i>	1.8 l	2.2 ij	2	0.3
<i>Trifolium subterraneum</i>	2.9 jkl	2.4 hi	2.7	0.4
<i>Medicago sativa</i>	2.7 kl	2.9 ghi	2.8	0.1
<i>Melilotus albus</i>	3.1 jkl	2.7 ghi	2.9	0.3
<i>Trifolium pratense</i>	3.2 jkl	3.1 fgghi	3.1	0
<i>Avena sativa</i>	2.7 kl	3.8 efghi	3.2	0.7
<i>Vicia pannonica</i>	3.8 hijkl	3.3 fgghi	3.5	0.3
<i>Trifolium resupinatum</i>	3.4 ijkl	3.7 efghi	3.5	0.2
<i>Lens culinaris</i>	3 jkl	4.4 efg	3.7	1
<i>Trifolium alexandrinum</i>	4.7 ghijk	4.1 efgh	4.4	0.4
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	6 defg	3.1 fgghi	4.6	2.1
<i>Trifolium incarnatum</i>	5.5 efghi	4.8 def	5.2	0.5
<i>Trigonella caerulea</i>	5.1 fghij	5.3 de	5.2	0.1
<i>Vicia villosa</i>	5.8 efgh	4.8 def	5.3	0.7
<i>Lathyrus sativus</i>	7.1 def	5.3 de	6.2	1.3
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	7.2 cdef	5.2 de	6.2	1.4
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	8 cd	6.3 cd	7.2	1.2
<i>Vicia sativa</i>	7.6 cde	7.5 bc	7.6	0.1
<i>Lupinus albus</i>	9.2 c	6.2 cd	7.7	2.1
<i>Vicia faba</i>	11.8 b	8.6 b	10.2	2.3
<i>Glycine max</i>	14.6 a	11.3 a	13	2.4

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)

Le magnésium est peu exporté: de 1,2 à 13 kg/ha en moyenne des 2 expérimentations (Tableau 24). La fêverole et le soja sont relativement gourmands en Mg et se distinguent significativement entre elles et de toutes les autres espèces. Les écarts types sont indiqués



peu de variabilité. La phacélie est ici un peu moins performante que pour les précédents éléments mais encore en-dessus de la moyenne.

4.9 Taux de destruction par le gel :

Les données observées ne concernent que les 2 expérimentations de Changins. Les conditions météo de l'hiver 2010-2011 peuvent être qualifiées de normales avec quelques jours de gel compris entre -5 et -10 °C, alors que l'hiver 2011-2012 a été plus froid début février avec plusieurs jours consécutifs de gel intense situé en dessous de -10°C, sans neige et par vent du nord.

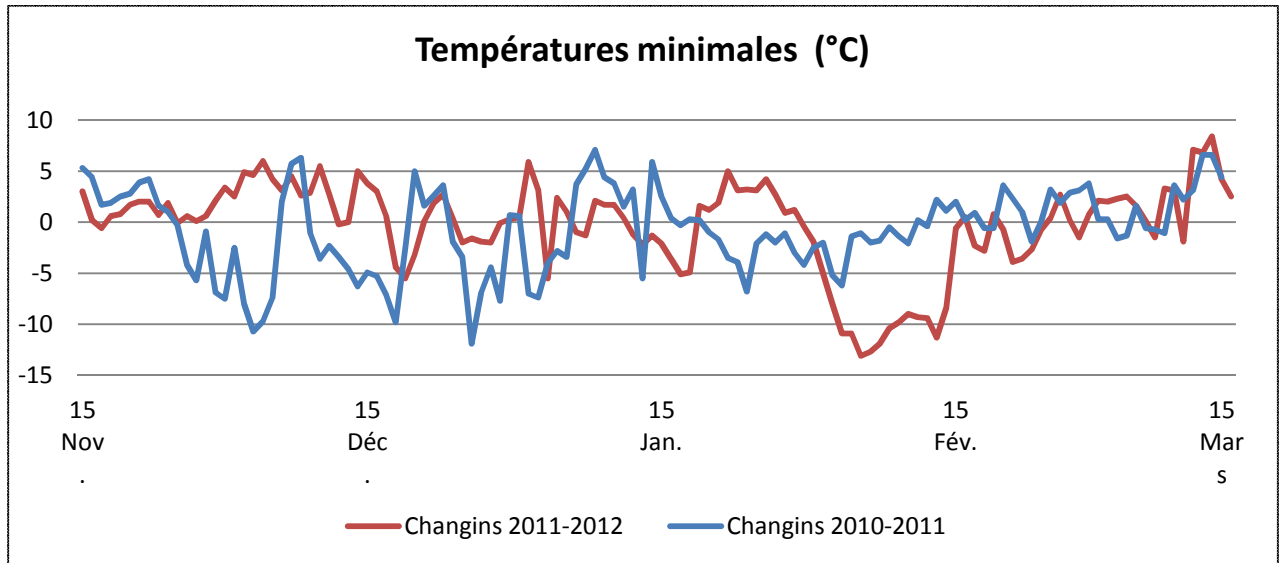


Figure 17: Températures hivernales minimale durant les 2 hivers d'expérimentation

Les dates des observations de la couverture du sol à Changins au printemps suivant sont respectivement le 06.04.2011 et le 07.04.2012.

Les taux de couverture à la sortie de l'hiver sont calculés à l'aide de tests de Duncan (Annexe XII).



4.9.1 Légumineuses vivantes au printemps

Tableau 25: Couverture du sol par les plantes testées vivantes à la reprise de végétation (%)

Espèces	Changins 2010*		Changins 2011*	
<i>Cicer arietinum</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Glycine max</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Lathyrus sativus</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Lens culinaris</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Avena sativa</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Lotus corniculatus</i>	86.7	abcd	21.7	d
<i>Lupinus albus</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Lupinus angustifolius</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Medicago lupulina</i>	66.7	ef	40.0	bc
<i>Medicago sativa</i>	80.0	cd	66.7	a
<i>Melilotus albus</i>	81.7	bcd	66.7	a
<i>Onobrychis viciifolia</i>	91.7	abcd	26.7	cd
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Sol nu</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Trifolium alexandrinum</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Trifolium hybridum</i>	95.0	ab	46.7	b
<i>Trifolium incarnatum</i>	86.7	abcd	0.0	e
<i>Trifolium pratense</i>	93.3	abc	66.7	a
<i>Trifolium repens</i>	96.7	a	38.3	bc
<i>Trifolium resupinatum</i>	61.7	fg	0.0	e
<i>Trifolium subterraneum</i>	53.3	g	0.0	e
<i>Trigonella caerulea</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Vicia faba</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Vicia pannonica</i>	78.3	de	0.3	e
<i>Vicia sativa</i>	0.0	h	0.0	e
<i>Vicia villosa</i>	100.0	a	18.3	d

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)

Les observations de résistance au gel des espèces ne sont valables que pour les cultivars utilisés dans nos expérimentations. L'effet variétal est probablement important et nécessiterait d'autres expérimentations. L'effet du gel intense de février 2012 est très visible sur les taux de couverture de l'expérimentation 2011-2012, qui sont inférieurs de 20 à 80 % par rapport à ceux de 2010-2011. Certaines espèces ayant bien hiverné en 2010-2011, n'ont pas supporté le gel de février 2012, ce sont le trèfle incarnat, le trèfle de perse, le trèfle souterrain et la vesce de Hongrie.



Les espèces gélives sous le climat du plateau suisse sont : le pois chiche, le soja, la gesse cultivée, les 2 variétés de lentille, le lupin bleu et le lupin blanc, les 2 variétés de pois, le trèfle d'Alexandrie, la trigonelle bleue, le fenugrec, la fève, et la vesce cultivée.

Les espèces pluriannuelles et hivernantes sous le climat du plateau suisse sont, dans les cultivars expérimentés: le lotier corniculé, la luzerne lupuline, la luzerne cultivée, le mélilot blanc, l'esparcette, le trèfle hybride, le trèfle violet, le trèfle blanc et la vesce velue.

Les espèces présentant la meilleure résistance au gel sont les luzernes lupulines et cultivées, le mélilot blanc et le trèfle violet.

4.9.2 Adventices vivantes au printemps

Les adventices ayant hiverné à Changins sont essentiellement des repousses de colza et de blé ainsi que quelques adventices sauvages : *Lamium purpureum* et *Capsella bursa pastoris*.

Ces données sont difficiles à interpréter pour 2 raisons:

- L'effet du gel intense de février 2012 masque partiellement l'effet des procédés.
- La présence d'une forte infestation de colza, inégalement répartie dans l'expérimentation 2011, interfère

Toutefois la comparaison des données permet de dégager les tendances suivantes :

Les meilleures espèces, avec moins de 10 % de couverture adventices à la reprise de végétation en moyenne des 2 années sont : l'avoine, le pois Arvika, le trèfle incarnat et le trèfle de Perse.

Les espèces encore intéressantes avec des taux de couverture adventices au printemps compris entre 10 et 20 % sont : le pois chiche, la lentille, le lotier corniculé, les luzernes lupulines et cultivées, l'esparcette, la phacélie, le pois Hardy, les trèfles hybrides, violet et blanc, la fève et la vesce cultivée.

L'effet du cultivar est bien visible pour les 2 variétés de pois et de lentilles qui ont un comportement différent. Aucune conclusion ne peut être faite pour la gesse cultivée qui par défaut de germination s'est comportée comme un sol nu en 2010.



Tableau 26: Couverture du sol par les adventices à la reprise de végétation (%)

Espèces	Changins 2010*		Changins 2011*	
<i>Avena sativa</i>	5.0	c	0.3	b
<i>Cicer arietinum</i>	20.0	abc	18.3	ab
<i>Glycine max</i>	36.7	abc	13.3	ab
<i>Lathyrus sativus</i>	70.0	a	13.3	ab
<i>Lens culinaris</i>	6.7	c	13.3	ab
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	18.3	abc	25.0	ab
<i>Lotus corniculatus</i>	13.3	bc	25.0	ab
<i>Lupinus albus</i>	43.3	abc	7.7	ab
<i>Lupinus angustifolius</i>	33.3	abc	23.3	ab
<i>Medicago lupulina</i>	10.0	bc	26.7	ab
<i>Medicago sativa</i>	16.7	bc	21.7	ab
<i>Melilotus albus</i>	15.0	bc	26.7	ab
<i>Onobrychis viciifolia</i>	8.3	bc	16.7	ab
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	13.3	bc	3.3	b
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	5.0	c	5.0	ab
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	20.0	abc	7.7	ab
<i>Sol nu</i>	60.0	ab	20.0	ab
<i>Trifolium alexandrinum</i>	43.3	abc	8.3	ab
<i>Trifolium hybridum</i>	5.0	c	26.7	ab
<i>Trifolium incarnatum</i>	6.7	c	8.3	ab
<i>Trifolium pratense</i>	6.7	c	21.7	ab
<i>Trifolium repens</i>	3.3	c	21.7	ab
<i>Trifolium resupinatum</i>	8.3	bc	8.3	ab
<i>Trifolium subterraneum</i>	26.7	abc	26.7	ab
<i>Trigonella caerulea</i>	33.3	abc	20.0	ab
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	46.7	abc	8.3	ab
<i>Vicia faba</i>	36.7	abc	0.0	b
<i>Vicia pannonica</i>	5.0	c	31.7	a
<i>Vicia sativa</i>	0.0	c	15.0	ab
<i>Vicia villosa</i>	0.0	c	10.0	ab

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles ($p < 0.5$)



4.9.3 Couverture du sol au printemps par les résidus

Les résidus observés sont composés de la biomasse morte des plantes testées et des adventices sans distinction.

Tableau 27: Couverture du sol par les résidus à la sortie de l'hiver (%)

Espèces	Changins 2010*		Changins 2011*	
<i>Avena sativa</i>	53.3	bc	100	a
<i>Cicer arietinum</i>	26.7	def	26.7	de
<i>Glycine max</i>	23.3	defg	36.7	cde
<i>Lathyrus sativus</i>	26.7	def	90	ab
<i>Lens culinaris</i>	96.7	a	80	ab
<i>Lens culinaris cv.canada</i>	90.0	a	60	bcd
<i>Lotus corniculatus</i>	20.0	efgh	13.3	e
<i>Lupinus albus</i>	33.3	de	78.3	ab
<i>Lupinus angustifolius</i>	40.0	cd	26.7	de
<i>Medicago lupulina</i>	23.3	defg	13.3	e
<i>Medicago sativa</i>	8.3	ghi	30	cde
<i>Melilotus albus</i>	13.3	fghi	33.3	cde
<i>Onobrychis viciifolia</i>	8.3	ghi	23.3	de
<i>Phacelia tanacetifolia</i>	53.3	bc	98.3	a
<i>Pisum sativum cv.Arvida</i>	93.3	a	100	a
<i>Pisum sativum cv.Hardy</i>	88.3	a	98.3	a
Sol nu	23.3	defg	13.3	e
<i>Trifolium alexandrinum</i>	63.3	b	76.7	ab
<i>Trifolium hybridum</i>	8.3	ghi	10	e
<i>Trifolium incarnatum</i>	26.7	def	65	abc
<i>Trifolium pratense</i>	5.0	hi	10	e
<i>Trifolium repens</i>	5.0	hi	13.3	e
<i>Trifolium resupinatum</i>	33.3	de	38.3	cde
<i>Trifolium subterraneum</i>	30.0	def	30	cde
<i>Trigonella caerulea</i>	13.3	fghi	36.7	cde
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	26.7	def	83.3	ab
<i>Vicia faba</i>	53.3	bc	100	a
<i>Vicia pannonica</i>	33.3	de	40	cde
<i>Vicia sativa</i>	100.0	a	60	bcd
<i>Vicia villosa</i>	0.0	i	66.7	abc

*Les valeurs n'ayant aucune lettre en commun sont significativement différentes entre elles (p<0.5)

Ces données sont aussi fortement influencées par les conditions différentes du climat des 2 hivers d'expérimentation. Les espèces laissant au printemps une couverture de résidus importantes (>50%) sont les espèces annuelles et gélives, à fort développement de biomasse : l'avoine, la gesse cultivée, les lentilles le lupin blanc, la phacélie, les pois, le trèfle d'Alexandrie, le fénugrec, la fèverole et la vesce cultivée.



A l'inverse, les espèces laissant peu de biomasse morte au printemps sont des espèces hivernantes, ayant relativement bien inhibé les adventices : le lotier corniculé, la luzerne lupuline, la luzerne cultivée, le trèfle hybride, le trèfle violet et le trèfle blanc.

4.10 Observation de la pénétration des socs lors du semis direct

Dans l'essai de Changins 2010, il a été possible d'observer le 7 avril 2011 un semis direct de tournesol au travers de la couverture de végétation morte et vivante telle que décrite précédemment. Les conditions étaient sèches et le sol bien ressuyé. Aucun travail du sol ni traitement herbicide total n'a été fait précédemment. La machine utilisée est un semoir pneumatique à disque de marque MONOSEM, type : NG PLUS-6R, le poids à vide de la machine est relativement faible avec 1'592 kg.

Aucun bourrage n'a été constaté lors de cette opération. Le semis mono-graine de tournesol a été possible sans aucune restriction, y compris dans les parcelles présentant une forte couverture de biomasse morte ou vivante.



Figure 15 : Semis direct de tournesol à Changins, printemps 2011

Dans les couverts bien vivants et denses, comme la vesce velue (*vicia villosa*), la ligne de semis est restée ouverte à cause de la densité des racines de surface. Ce phénomène a causé des échecs de germination car le sillon ouvert, expose la jeune plantule à l'air et au rayonnement solaire ce qui a provoqué sa destruction.

Le désherbage a été problématique : totalement insuffisant pour les espèces ayant bien hiverné qui ont « étouffé » la culture, il a conduit à un échec de récolte sur la parcelle expérimentale. Cette constatation montre bien que la question des couverts végétaux doit être raisonnée à l'intérieur des systèmes culturaux, comme suggéré par Wilke et Snapp (2008) ainsi que Bodmer (2009).



5 Conclusions

Les légumineuses étudiées montrent effectivement des aptitudes très différentes quant à leurs capacités à être utilisées comme couvert végétal. Il est possible de donner des réponses concrètes aux questions de recherche.

Concernant la **formation de la biomasse aérienne**, les espèces les plus productives atteignent 50 à 60 q.MS/ha. Sur 25 espèces de légumineuses testées, 10 dépassent les 30 q.MS/ha, seuil pouvant être proposé comme le rendement minimal souhaitable pour concurrencer efficacement les adventices avec moins de 10 % d'adventices dans le couvert.

La dynamique de croissance des différentes espèces est très variable. Le nombre de jours pour atteindre 50 % de couverture du sol varie entre 18 et 40 jours. 7 espèces atteignent 50 % de couverture du sol avant 22 jours, délai qui peut être considéré comme garantissant globalement moins de 10 % d'adventice en fin de végétation.

Ces 2 caractéristiques, à savoir la *capacité à former de la biomasse et la dynamique de croissance* déterminent une grande part de **la capacité des espèces à concurrencer les adventices**. Sur la base d'analyses de corrélations nous pouvons estimer que globalement la capacité de concurrence des espèces vis-à-vis des adventices est influencée à 36 % par la dynamique de croissance et à 58 % par la capacité à former de la biomasse de l'espèce concernée dans les conditions de nos essais. Toutefois d'autres facteurs interviennent encore parallèlement, notamment l'allélopathie qui peut être très variable d'une espèce à l'autre.

En combinant les 2 facteurs : *capacité à former de la biomasse et la dynamique de croissance*, 6 espèces peuvent être retenues : *la vesce velue, Le pois, la vesce cultivée, la gesse cultivée, la lentille et le trèfle incarnat*.

La capacité de concurrence des espèces testées vis-à-vis de plantes accompagnatrices a pu être testée grâce aux mélanges expérimentaux avec l'avoine et la phacélie, dans l'optique de les intégrer dans des mélanges d'espèces pour couverts végétal. Indifféremment des 2 partenaires, les espèces les plus intéressantes dépassant 50 % de légumineuses dans le mélange à la récolte sont : *le pois, la vesce cultivée, la vesce velue, la fèverole, la gesse cultivée et le lupin blanc*.

Sur la base de la méthode de l'Abondance Naturelle de l'isotope lourd N¹⁵, il a été possible de montrer que les légumineuses testées ont **biologiquement fixé** dans leur biomasse aérienne **des quantités d'azote** variant de pratiquement 0 à plus de 150 kg Ndfa/ha. Les espèces les plus productives (> 70 kg Ndfa/ha) ont été : *la vesce velue, la fèverole, la vesce cultivée, la gesse cultivée, le pois, la lentille, la vesce de Hongrie, le trèfle de Perse, la luzerne cultivée, le trèfle d'Alexandrie et le trèfle incarnat*.

De l'azote biologiquement fixé se trouve aussi dans la biomasse souterraine, probablement en plus grande concentration du fait de la présence des nodules. Globalement la quantité souterraine peut être estimée environ égale à la quantité aérienne, mais une étude de littérature serait aussi encore utile pour préciser ce point.

Une autre question qui mérite plus amples recherches est le devenir de l'azote biologiquement fixé. La question fondamentale est de définir le point de rupture idéal du couvert végétal en fonction des conditions pédoclimatiques et de l'itinéraire cultural pour limiter au minimum les pertes de Ndfa par lixiviation et/ou dénitrification



En vue de créer **des couverts végétaux sensibles au gel**, pour idéalement se passer d'herbicide total au printemps, les espèces parmi celles réputées les plus intéressantes sont confirmées dans nos essais comme suit : *la gesse cultivée, la lentille, le lupin blanc, le pois, le trèfle d'Alexandrie, la fève, la vesce cultivée, et le fenugrec*.

Lors d'un seul essai sur le site de Changins, au printemps 2011, les différentes espèces testées ont semblé très bien **s'adapter au semis direct**, aucun procédé n'a provoqué de bourrage.

Selon l'ensemble des différents critères précédemment observés, 5 espèces ressortent régulièrement comme les plus avantageuses : la gesse cultivée, la lentille, le pois, la fève et la vesce cultivée.

La présence dans nos expérimentations de 2 cultivars de pois et de lentille montre bien que le comportement variétal peut parfois varier significativement au sens statistique du terme. Ceci nous amène à conclure que de nouvelles expérimentations sur ce thème doivent inclure différentes variétés des espèces les plus prometteuses afin d'affiner encore les critères de choix et les potentiels de fonction. Cette option est une condition pour développer des couverts végétaux bien adaptés aux différents services attendus d'eux dans le cadre d'une approche globale des systèmes culturaux, telle que proposée par Bodmer (2010) et développée par ACW.

Pour les prochaines décennies, la sécurité alimentaire va devenir une priorité à l'échelle de la planète. La gestion de l'eau est certainement le thème principal. Pourtant, la fixation biologique de l'azote par les légumineuses, conjointement avec la fixation industrielle doivent être aussi développées parallèlement pour répondre à cette demande absolument vitale pour l'humanité. Comparée au procédé industriel, la FBA n'offre actuellement pas réellement d'avantage énergétique mais plutôt des avantages écologiques. Ces avantages écologiques sont pourtant très importants car ils sont le garant de la pérennité de nos écosystèmes garantissant ainsi nos approvisionnements en air, en eau et en nourriture et donc, très brutalement, la survie de notre espèce.

C'est vraiment la source énergétique qui différencie actuellement les deux procédés fixateurs d'azote atmosphérique. Le procédé biologique est basé sur l'azote atmosphérique et sur la photosynthèse, donc sur l'énergie solaire qui tous deux sont considérés comme renouvelables. Le procédé industriel, lui, est basé sur une ressource également renouvelable pour ce qui est l'azote atmosphérique mais sur de l'énergie fossile (pétrole, gaz ou charbon) pour d'une part l'énergie consommée par le processus, mais d'autre part pour l'hydrogène nécessaire à la synthèse de NH_3 . (Annexe 6).

A l'avenir, il est possible d'imaginer que le procédé Haber-Bosch devienne plus performant sur le plan écologique mais peu de progrès sont à attendre du point de vue de l'efficacité énergétique qui est déjà très élevée. Dans l'hypothèse où l'énergie consommée par la synthèse industrielle devienne renouvelable (hypothèse personnelle) et non plus fossile, par exemple solaire ou issue de la biomasse ou éolienne, alors le bilan deviendrait nettement plus avantageux d'un point de vue écologique. On peut aussi rêver du développement, comme vecteur énergétique, de l'hydrogène et des technologies connexes (pile à combustible). Le remplacement du charbon ou du gaz naturel comme source d'hydrogène par de l'hydrogène issu de l'hydrolyse de l'eau serait ainsi possible et rendrait le procédé industriel parfaitement neutre du point de vue du bilan carbone. En attendant la réalisation (possible) de ces visions futuristes, il est important de développer les avantages bien réels



de la fixation biologique de l'azote par les légumineuses, tout en se préoccupant du devenir de cet azote biologiquement fixé dans nos sols.

La recherche dans le domaine des couverts végétaux est un nouveau chantier récemment ré-ouvert. Ce domaine est encore relativement vierge et laisse un bel espace de liberté pour les chercheurs agronomes. Il est à souhaiter que la recherche agronomique Suisse profite de sa présente restructuration pour consolider son avantage et ne pas se laisser distancer dans ce secteur prometteur visant à développer une agriculture « écologiquement intensive ». L'intérêt pour cette discipline est maintenant largement perçu et offre de belles opportunités de recherche multidisciplinaire et internationale.

Ces objectifs sont réalisables à relativement court terme par le développement et l'utilisation des couverts végétaux en cultures associées qui laissent entrevoir un important potentiel.

Il y a encore du travail pour les agronomes dans ce domaine, relativement neuf et ouvert, afin de sélectionner les espèces végétales et les mélanges de couverts végétaux adaptés aux différentes conditions pédoclimatiques, aux systèmes culturaux et aux objectifs agronomiques visés.



6 Bibliographie:

- Auerswald K, Schaufele R, Schnyder H, 2010. Paths of nitrogen transfer from *Trifolium repens* to non-legume plants in unfertilised pastures, Germany, 752-754.
- Bergstrom L, Kirchmann H, 2004. Leaching and crop uptake of nitrogen from nitrogen-15-labeled green manures and ammonium nitrate. *Journal of environmental quality* 33 (5), 1786–1792.
- Beschow H, Schulze J, Merbach W, 2000. Transfer of symbiotically fixed nitrogen in an alfalfa-grass mixture studied through isotope dilution in a pot experiment. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 36 (1), 21–33.
- Bodner G, Himmelbauer M, Loiskandl W, Kaul H, 2010. Improved evaluation of cover crop species by growth and root factors. *Agronomy for Sustainable Development* 30 (2), 455–464.
- Brehmer B, Struik PC, Sanders J, 2008. Using an energetic and exergetic life cycle analysis to assess the best applications of legumes within a biobased economy. *Biomass and Bioenergy* 32 (12), 1175–1186.
- Brophy LS, Heichel GH, Russelle MP, 1987. Nitrogen transfer from forage legumes to grass in a systematic planting design. *Crop Science* 27 (4), 753–758.
- Burity HA, Faris MA, Coulman BE, Ta TC, 1989. Evaluation of nitrogen transfer from nodulated lucerne to associated grasses under field conditions. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 24 (4), 399–407.
- Campbell NA, Reece JB, 2007. *Biologie*. Pearson education France, Paris, 1334 p.
- Caporali F, Campiglia E, Mancinelli R, Paolini R, 2004. Maize performances as influenced by winter cover crop green manuring. *Italian Journal of Agronomy* 8 (1), 37–45.
- Crews TE, Peoples MB, 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 102 (3), 279–297.
- Danso SK. Sustainable agriculture: The role of biological nitrogen fixing plants. Dans: Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation. Proceedings of an international symposium on nuclear and related ..., held in Vienna, 1995. International Atomic Energy Agency, Vienna, p.16
- Dawson CJ, Hilton J, Lawrence DBSJGCCIHLMJPRSTC, 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* 36 (S1), S14.
- Erkovan HI, Tan M, Haltlgl MB, Kslal H, 2008. Performance of white clover-grasses mixtures: Part-II. Nitrogen fixation and transfer from white clover to associates grasses. *Asian Journal of Chemistry* 20 (5), 4077–4084.
- Fageria NK, 2007. Green manuring in crop production. *Journal of Plant Nutrition* 30 (4/6), 691–719.
- Fageria NK, Baligar VC, Bailey BA, 2005. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36 (19/20), 2733–2757.
- Farnham DE, George JR, 1993. Dinitrogen fixation and nitrogen transfer among red clover cultivars. *Canadian Journal of Plant Science* 73 (4), 1047–1054.
- Farnham DE, Mallarino AP, Wedin WF, Carlson IT, 1991. Comparison of dinitrogen fixation and nitrogen transfer potentials of four red clover cultivars. *JIAS Journal of the Iowa Academy of Science* 98 (4), 162–166.
- Gebhart DL, 1991. Biological dinitrogen fixation and transfer of fixed nitrogen in grass-legume mixtures in the Great Basin. *Dissertation Abstracts International. B, Sciences and Engineering* 52 (6), 2825B.
- Gehring C, Vlek PL, Souza LA de, Denich M, 2005. Biological nitrogen fixation in secondary regrowth and mature rainforest of central Amazonia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111 (1-4), 237–252.
- Giacomini SJ, Aita C, Vendruscolo ERO, Cubilla M, Nicoloso RS, Fries MR, 2003. Dry matter, C/N ratio and nitrogen, phosphorus and potassium accumulation in mixed soil cover crops in Southern Brazil: *Materia seca, relacao C/N e acumulo de nitrogenio*,



- fosforo e potassio em misturas de plantas de cobertura de solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 27 (2), 325–334.
- Herridge DF, op. 2008. Inoculation technology for Legumes. Dans: Nitrogen-fixing leguminous symbioses. Springer, Dordrecht, p.
- Jensen ES, Hauggaard-Nielsen H, 2003. How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and Soil* 252 (1), 177–186.
- Jiang SanNai, Zhai MingPu, 2000. Nitrogen transfer between N₂-fixing plants and non-N₂-fixing plants. *Journal of Forestry Research* 11 (2), 75–80.
- Khanh TD, Chung MI, Xuan TD, Tawata S, 2005. The exploitation of crop allelopathy in sustainable agricultural production. *Journal of Agronomy and Crop Science* 191 (3), 172–184.
- Lauber K, Wagner G, Gfeller E, Kurz G, op. 2001. *Flora Helvetica: Flore illustrée de Suisse*. P. Haupt, Bern ;, Stuttgart [etc], 1615 p.
- Mariotti A, Mariotti F, Amarger N, Pizelle G, Ngambi JM, Champigny ML, Moysse A, 1980. Nitrogen isotope fractionation during nitrate absorption and nitrogen fixation by plants. *Physiologie Vegetale* 18 (1), 161-138.
- Moyer-Henry KA, Burton JW, Israel DW, Rufty TW, 2006. Nitrogen transfer between plants: a ¹⁵N natural abundance study with crop and weed species. *Plant and Soil* 282 (1/2), 7–20.
- Patra DD, Sachdev MS, Subbiah BV, 1986. ¹⁵N studies on the transfer of legume-fixed nitrogen to associated cereals in intercropping systems. *Biology and Fertility of Soils* 2 (3), 165–171.
- Peoples MB, Herridge DF, Ladha JK, Ladha JKPMB, 1995. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant and Soil* 174 (1/2), 3–28.
- Pointereau P, 2001. Légumineuses: quels enjeux ecologiques? Dans: *Courrier de l'environnement de l'INRA* No 44. Légumineuses: quels enjeux ecologiques? INRA ME & S, Paris, p.
- Singh HP, Batish DR, Kohli RK, 2003. Allelopathic interactions and allelochemicals: new possibilities for sustainable weed management. *Critical Reviews in Plant Sciences* 22 (3/4), 239–311.
- Thorup-Kristensen K, Magid J, Jensen LS, 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. Dans: *Advances in Agronomy*. Academic Press, p 227–302.
- Unkovich M, 2008. Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra ACT.
- Vullioud P, Delabays N, Frei P, Mercier E, 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins: III. Mauvaises herbes, maladies fongiques et ravageurs. *Revue Suisse d'Agriculture* 38 (2), 81–87.
- Vullioud P, Mercier E, 2004. Résultats de 34 ans de culture sans labour à Changins: I. Evolution des rendements. *Revue Suisse d'Agriculture* 36 (5), 201–212.
- Vullioud P, Neyroud J, Mercier E, 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins: II. Evolution des propriétés du sol. *Revue Suisse d'Agriculture* N°38, 1–16.
- Wilke BJ, Snapp SS, 2008. Winter cover crops for local ecosystems: linking plant traits and ecosystem function. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88 (4), 551–557.
- Xiao YanBo, Li Long, Zhang FuSuo, 2004. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ¹⁵N techniques. *Plant and Soil* 262 (1/2), 45–54.



7 Annexes

Annexe 1: Définition du projet de travail de master

Nom de l'étudiant / étudiante:	Gebhard Claude-Alain
Titre du travail:	Evaluation au champ du potentiel agronomique de 30 espèces de légumineuses comme couvert végétal en inter-culture
Contexte et état des connaissances:	<p>Le rôle bénéfique des légumineuses dans les systèmes agricoles visant à préserver les ressources naturelles est connu. Les rotations incluant de légumineuses peuvent réduire la consommation d'énergie fossile et limiter les émissions de gaz à effet de serre.</p> <p>En Suisse, l'Ordonnance sur les paiements directs incite fortement les agriculteurs à mettre en place des engrais verts en inter-culture. Cette pratique est maintenant bien utilisée mais il est certainement possible d'augmenter grandement l'efficacité de cette mesure en choisissant des associations végétales mieux adaptées et plus efficaces en fonction des buts recherchés qui peuvent varier et se cumuler selon les situations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la fertilité du sol - Lutte contre l'érosion - Capture et recyclage d'éléments minéraux en excès dans le sol - Biosynthèse d'azote avec économie d'intrants et de GES - Lutte contre les adventices - Diminution de la pression des maladies et des parasites pour la rotation - Augmentation de la teneur en matière organique du sol - Production de fourrage pour les ruminants - Stimulation de la vie micro-organique du sol - pédogenèse
Objectif du projet:	Evaluer et quantifier le potentiel agronomique d'une trentaine de légumineuses dans le but de créer des mélanges de cultures intercalaires plus performant quant à leur pouvoir de concurrence vis-à-vis des adventices et à leur capacité de biosynthèse de l'azote.
Objet de recherche, et questions de la recherche:	<p>1. Certaines légumineuses ou groupes de légumineuses présentent elles de meilleures aptitudes que d'autres quant à leurs capacités de créer de la biomasse et, par là, à concurrencer les adventices ?</p> <p>2. Certaines légumineuses ou groupes de légumineuses présentent elles des meilleures capacités à synthétiser de l'azote organique et si oui combien d'azote peuvent elles mettre à disposition de la culture suivante ?</p> <p>3. Certaines légumineuses ou groupes de légumineuses permettent elles une meilleure utilisation des techniques culturales simplifiées et du semis direct l'année suivante ?</p> <p>4. Quelle est leur pouvoir de concurrence dans un mélange expérimental avec de l'avoine, quelle est leur aptitude à être associées ?</p>
Méthodes et théorie:	<p>Expérimentation au champ :</p> <ul style="list-style-type: none"> - microparcelles en station (split plots) - essai en bandes » on farm « en complément <p>Expérimentation dans le laboratoire de la HESA et ACW</p>



Annexe 2: Calcul de quantité d'azote pour un pot expérimental estimé à 10 litres de sol

$$20 \text{ mg N /pot} = 20 \text{ mg /10 litres} = 2 \text{ g N/m}^3$$

Pour un mètre de sol exploitable par les racines : 10'000 m³ de sol par ha

$$2 \text{ g N} * 10'000 \text{ m}^3 = 20 \text{ kg N /ha}$$



Annexe 3: Expérimentation « Valeurs B »

B value experiment material and methods

Rationale:

The experiment is used to derive the legume specific fractionation of $\delta^{15}\text{N}$ within legumes grown without external Nitrogen (N) input (e.g. fertilizer- or soil N). See a detailed description in Unkovich et al. (2008, chapter 8).

General course of the experiment

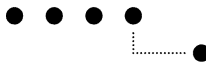
1. Sterilization of the seeds, pots and substrate
2. Preparation of soil inoculum
3. Preparation of a N-free nutrient solution
4. Seeding and transplanting
5. Cultivation (maintaining the growth during a relevant period of time)
6. Harvest and sample preparation

1. Sterilization of the seeds, pots and substrate

- Seed sterilization, using the method described in (Hellsten and Huss-Danell 2000), $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (5min) followed by washing 2 times with bi distilled water and than shaking in 30% H_2O_2 for 15 min followed by 4 washings with bi distilled water
- For some seeds this method may be seed damaging, a reduction to 5% H_2O_2 can be used
- Other methods may be also liable (e.g. fumigation, method to be added)
- Pots and tray should be washed carefully and dried at 60°C for some days (or use new ones)
- The plant substrate should be completely N free, sand with a grain size of 0.7 – 1.2 mm (e.g. Quarzsand from Carlo Bernasconi AG, www.carloag.ch) proved a good growing medium for such experiments, do not use hygromull or Styromull because it contains N forms which become plant available with time (Werminghausen, 1972)
- The sand should be washed (rinsing with distilled water) and sterilized (place in an oven with temperatures around 100°C for at least some hours)

2. Soil inoculum

- The inoculum should be made from fresh soil (ideally from the same field were the legumes are grown) shortly before seeding
- Shake fresh soil in sterile de-ionized water (soil solution ratio 1:10)
- Sieve soil suspension through 20 μm soil sieve (steel net)
- The suspension should be stored at 4°C (stable for view weeks)



Recette solution nutritive experimentation "valeur B"

Used Chemical	Evans	McKnight	Eschikon	
			strong	weak
Macro elements (mM)				
MgSO ₄ 7 H ₂ O	0.2	0.4	2	0.4
CaCl ₂ . 2 H ₂ O	0.05	0.03	2	0.04-0.08
KCl	---	2.0	---	---
K ₂ SO ₄	0.16	---	2	2
KH ₂ PO ₄	0.0169	0.7	0.5	0.5
K ₂ HPO ₄ . 3 H ₂ O	0.0833	---	0.5	0.5
Fe-Na ₂ -EDTA	1.79	---	---	---
FeCl ₃ -EDTA	---	0.045	---	---
Fe-Chelat EDTA**	---	---	1	0.32
Trace elements (uM)				
H ₃ BO ₃	2.31	23.1	4.5	4.5
MnCl ₂ 4 H ₂ O	0.46	5.1	1.8	1.8
ZnCl ₂	0.08	0.8	1	1
CuSO ₄ . 5 H ₂ O	0.03	0.2	0.3	0.3
Na ₂ MoO ₄ 2 H ₂ O	0.02	0.2	0.1	0.1
CoCl ₂ 6 H ₂ O	0.05	---	0.2	0.2

based on recipe from

in Carlsson, G., C. Palmberg, et al. (2006). "Discrimination against N-15 in three N-2-fixing Trifolium species as influenced by Rhizobium strain and plant age." Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science 56(1): 31-38.

in Unkovich, M. J., D. F. Herridge, et al. (2008). Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. ACIAR Monograph series. Canberra, Australia. No.136.

Unkovich et al. 1994, Aust. J. Agric. Res. 45

adjusted to lower salt concentration (eC) from Eschikon weak evans and MC Knight



Topfversuch B-Value SHL Zollikofen

Chronologischer Ablauf

Datum	Arbeitsschritt
05.08.11	Ansaat der Pflanzen in Schalen (Klimaschrank)
07.08.11	Giessen Inoculum
12.08.- 17.08.11	Umtopfen (pikieren)
20.08.11	Inoculum
01.09.11	Töpfe ins Liechtifeld stellen
05.09.11	Inoculum
01.-02.11.11	Ernte und Trocknen



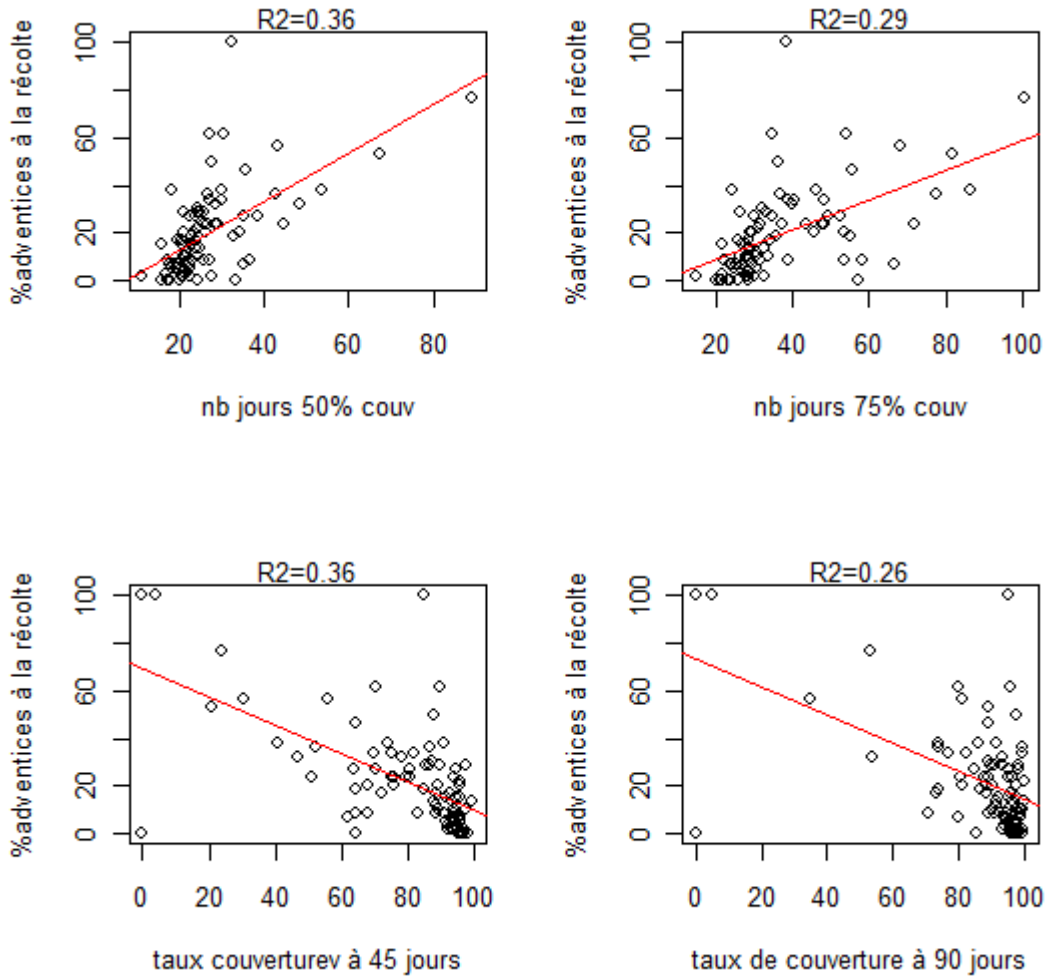
Annexe 4: Couverture du sol par les plantes testées à 45 et 90 jours

Taux de couverture (%), moyennes Duncan.test à 45 et 90 jours

Espèces	Changins 2010		Changins 2011		Zollikofen hivernant		Zollikofen VAT 2011	
	45 jours	90 jours	45 jours	90 jours	45 jours	90 jours	45 jours	90 jours
<i>Avena_sativa</i>	64 ef	86 bcd	94 a	86 bcd	94 a	86 bcd	94 a	86 bcd
<i>Cicer_arietinum</i>	76 cde	81 cde	91 ab	81 cde	91 ab	81 cde	91 ab	81 cde
<i>Glycine_max</i>	24 g	53 f	95 a	53 f	95 a	53 f	95 a	53 f
<i>Lathyrus_sativus</i>			94 a	-0 g	94 a	-0 g	94 a	-0 g
<i>Lens_culinaris</i>	97 a	99 a	93 a	100 a	93 a	100 a	93 a	100 a
<i>Lens_culinaris_cv.canada</i>	94 ab	97 ab	88 abc	97 a	88 abc	97 a	88 abc	97 a
<i>Lotus_corniculatus</i>	56 f	81 cde	30 g	81 cde	30 g	81 cde	30 g	81 cde
<i>Lupinus_albus</i>	64 ef	74 de	96 a	74 de	96 a	74 de	96 a	74 de
<i>Lupinus_angustifolius</i>	52 f	74 e	68 e	74 e	68 e	74 e	68 e	74 e
<i>Medicago_lupulina</i>	65 ef	89 abc	74 de	89 abc	74 de	89 abc	74 de	89 abc
<i>Medicago_sativa</i>	75 cde	89 abc	83 bcd	89 abc	83 bcd	89 abc	83 bcd	89 abc
<i>Melilotus_albus</i>	70 de	95 ab	81 cd	95 ab	81 cd	95 ab	81 cd	95 ab
<i>Onobrychis_viciifolia</i>	21 g	89 abc	47 f	89 abc	47 f	89 abc	47 f	89 abc
<i>Phacelia_tanacetifolia</i>	62 ef	80 cde	97 a	80 cde	97 a	80 cde	97 a	80 cde
<i>Pisum_sativum_cv.Arvida</i>	97 a	97 ab	96 a	98 a	96 a	98 a	96 a	98 a
<i>Pisum_sativum_cv.Hardy</i>	95 ab	98 ab	96 a	98 a	96 a	98 a	96 a	98 a
<i>Trifolium_alexandrinum</i>	100 a	100 a	95 a	100 a	95 a	100 a	95 a	100 a
<i>Trifolium_hybridum</i>	82 bcd	100 a	75 de	100 a	75 de	100 a	75 de	100 a
<i>Trifolium_incarnatum</i>	96 ab	98 ab	96 a	98 a	96 a	98 a	96 a	98 a
<i>Trifolium_pratense</i>	87 abc	100 a	79 d	100 a	79 d	100 a	79 d	100 a
<i>Trifolium_repens</i>	64 ef	96 ab	41 f	95 ab	41 f	95 ab	41 f	95 ab
<i>Trifolium_resupinatum</i>	95 ab	96 ab	95 a	96 ab	95 a	96 ab	95 a	96 ab
<i>Trifolium_subterraneum</i>	76 cde	89 abc	68 e	89 abc	68 e	89 abc	68 e	89 abc
<i>Trigonella_caerulea</i>	70 de	77 de	89 abc	77 de	89 abc	77 de	89 abc	77 de
<i>Trigonella_foenum.graecum</i>	51 f	81 cde	94 a	81 cde	94 a	81 cde	94 a	81 cde
<i>Vicia_faba</i>	65 ef	90 abc	97 a	89 abc	97 a	89 abc	97 a	89 abc
<i>Vicia_annonica</i>	89 ab	99 a	81 cd	99 a	81 cd	99 a	81 cd	99 a
<i>Vicia_sativa</i>	98 a	99 a	93 a	100 a	93 a	100 a	93 a	100 a
<i>Vicia_villosa</i>	97 a	97 ab	96 a	97 ab	96 a	97 ab	96 a	97 ab



**Annexe 5: Graphiques de corrélations % adventices et vitesse de couverture et
corrélation entre % adventices à la récolte et temps nécessaire à 50 % de
couverture**



**Et corrélation entre % adventices à la récolte et temps nécessaire à 50 % de
couverture**

summary(mod1) =

Call: lm(formula = mMS\$X.adventices ~ mMS\$t50)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-26.763	-8.781	-3.902	5.428	74.381

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-7.0653	4.1977	-1.683	0.0961 .
mMS\$t50	1.0088	0.1452	6.947	7.4e-10 ***

---la pente de le regression est hautment significative donc la correlation aussi



Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 14.83 on 84 degrees of freedom

(4 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.3649, Adjusted R-squared: 0.3573

R² = 0.365 signifie que 36,5 % de la variabilité de la proportion d'adventices dans la récolte est expliquée par la vitesse de couverture, autrement dit la vitesse de couverture explique à 36.5 % la variabilité de la proportion d'adventices à la récolte

F-statistic: 48.26 on 1 and 84 DF, p-value: 7.403e-10



Annexe 6: Les engrais azotés industriels

1. La production mondiale

La FBA a été la principale source azotée des systèmes culturaux pendant des siècles partout dans le monde, son importance a pourtant fortement diminué remplacée par des engrais azotés (Peoples et al. 1995).

Les engrais azotés naturels au 19^{ème} siècle étaient rares et chers. Ce n'est qu'au milieu du 20^{ème} siècle, suite à l'invention de la synthèse industrielle de l'ammoniaque (procédé Haber-Bosch), que les engrais azotés industriels sont devenus plus accessibles aux agriculteurs, surtout après la deuxième guerre mondiale. Les données de l'Association européenne des fabricants d'engrais (2004) montrent bien l'évolution de cette situation (Tableau a).

Tableau a: Production mondiale d'azote d'après Dawson (2011)

World nitrogen production by source and process, kt N (EFMA, 2004).

Fertiliser year	Chilean nitrate	Guano	Coke-oven ammonium sulphate	Calcium cyanamide	Electric arc Ca nitrate	Synthetic ammonia	Total
1850	5	-	-	-	-	-	5
1860	10	70	-	-	-	-	80
1870	30	70	-	-	-	-	100
1880	50	30	-	-	-	-	80
1890	130	20	-	-	-	-	150
1900	220	20	120	-	-	-	360
1910	360	10	230	10	-	-	610
1920	410	10	290	70	20	150	950
1930	510	10	425	255	20	930	2150
1940	200	10	450	290	-	2150	3100
1950	270	-	500	310	-	3700	4780
1960	200	-	950	300	-	9540	10,990
1970	120	-	950	300	-	30,230	31,600
1980	90	-	970	250	-	59,290	60,600
1990	120	-	550	110	-	76,320	77,100
2000	120	-	370	80	-	85,130	85,700

2. Une révolution mondiale et la dépendance alimentaire

Smil (2001), cité par Crews et Peoples (2004) a identifié le passage de l'ère de l'approvisionnement biologique de l'azote à l'approvisionnement industriel comme étant l'un des changements les plus importants que l'agriculture ait connus. Il estime que le procédé Haber-Bosch a été l'invention la plus importante du 20^{ème} siècle. Il soutient ses affirmations en montrant que 40 % de la population mondiale est dépendante de la synthèse industrielle de l'azote pour son alimentation et que le développement démographique à venir est en grande partie lié au procédé industriel pour la synthèse de son ADN et autres protéines corporelles. Ces projections sont reprises par Dawson (2011) qui citant Erismann et al. (2008) estime que c'est maintenant 48 % de la population mondiale qui dépend de la synthèse industrielle de l'azote pour sa nourriture (Figure a). Basé sur les prévisions démographiques des Nations Unies, Crews et Peoples (2004) estiment qu'en 2050 ce n'est pas moins de 5,5 milliards d'êtres humains qui dépendront des engrais azotés synthétiques.



Ils font aussi remarquer que cette énorme augmentation de la production agricole et donc de nourriture, a été rendue possible par les engrais azotés modernes de deux façons différentes. Premièrement une application judicieuse d'azote en fonction des besoins effectifs de la culture au cours de la saison de végétation permettant effectivement d'augmenter les rendements de manière importante. Deuxièmement, ces engrais azotés permettent aussi de raccourcir les rotations en éliminant les cultures qui garantissaient traditionnellement la fertilité du sol comme les prairies riches en légumineuses, qui occupaient 25 à 50 % des surfaces et les **couverts végétaux** qui eux aussi sont susceptibles de fournir de l'azote par fixation biologique. Ce dernier constat soutient aussi parfaitement le projet ACW « Nouvelles perspectives avec les couverts végétaux dans les techniques de conservation du sol ».

Dawson (2011) estime aussi que pour assurer la production alimentaire nécessaire à la population mondiale jusqu'en 2050, il sera nécessaire de recourir aussi bien à la fixation biologique de l'azote atmosphérique qu'à la synthèse industrielle. Il montre aussi la corrélation entre le développement de la population mondiale la synthèse industrielle de L'azote

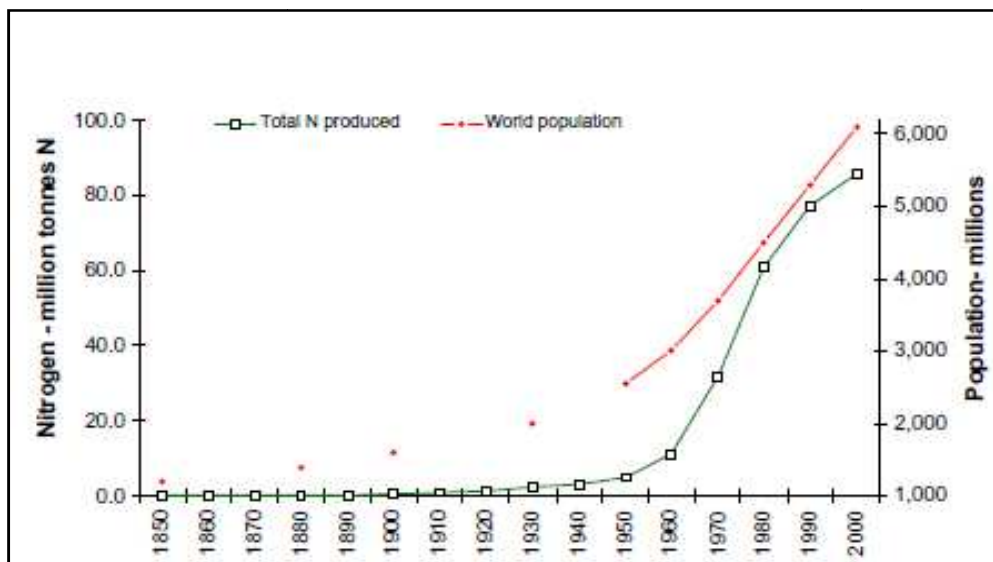
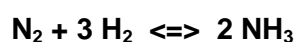


Figure a: Production d'engrais azotés en relation avec la population mondiale (Dawson 2011)

3. Consommation d'énergie

La synthèse industrielle de l'ammoniaque est une réaction fortement exothermique et elle requiert beaucoup d'énergie sous forme de pétrole ou de gaz naturel. Elle consomme aussi du gaz naturel (méthane) pour la fourniture de l'hydrogène nécessaire à la synthèse :



Dawson (2011), citant Jenssen et Kongshaus (2003), montre les énormes gains d'efficacité énergétique réalisés durant le 20^{ème} siècle pour ce procédé industriel (Figure b).

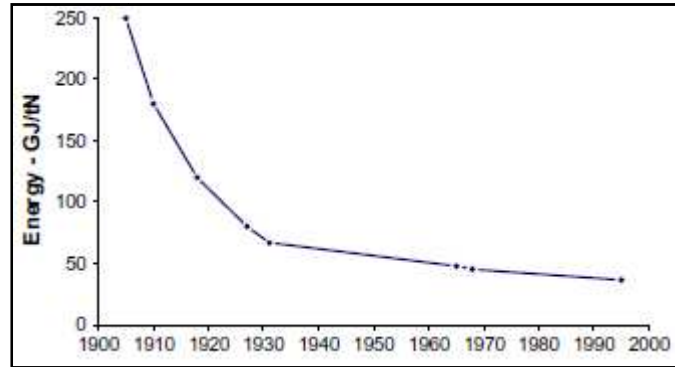


Figure b : Gain énergétique du procédé Haber-Bosch (Dawson 2011)

La consommation énergétique moyenne actuelle du procédé Haber-Bosch est de l'ordre de 45 GJ/tonne N ce qui correspond à 1000 litres de diesel par tonne d'azote c'est-à-dire à 1 litre de diesel par kilo d'azote épandu en cultures.

Citant J.D.Pach (communication personnelle), Dawson (2011) mentionne que le procédé le plus performant ne consomme que 34 GJ/tonne N. Ce chiffre est confirmé par Smil (2001), cité par Crews et Peoples (2004) qui affirme que le meilleur procédé ne consomme que 27 GJ/tonne NH_3 , ce qui correspond effectivement à 33 GJ/tonne N. Cette efficacité énergétique remarquable conforte les résultats obtenus par Brehmer et al. (2008)

Dawson (2011) fait état d'une consommation mondiale annuelle de 5850 PJ pour la fabrication mondiale de tous les engrais (azote, phosphore et potasse compris). Comparé à une consommation énergétique globale mondiale de 515'000 PJ, cela ne représente que le 1,1%...

4. Impacts écologiques

La revue de Jensen et al. (2003) traite principalement des bénéfices environnementaux de la FBA. Ils relèvent que la fabrication des engrais azotés est responsable d'environ 1 % des émissions totales de gaz carbonique d'origine humaine par leur consommation d'énergie fossile.

Comme Jensen et al. (2003), Crews et Peoples (2004) relèvent que l'utilisation des engrais azotés de synthèse provoque l'acidification des sols ainsi que des émissions d'oxydes nitrique (NO) et nitreux (NO_2), qui sont de puissants gaz à effet de serre, et surtout d'ammoniaque (NH_3).

Lorsque les apports d'engrais azotés ne sont pas synchronisés avec les besoins de la culture, les risques de percolation de l'azote soluble, sous forme nitrique, sont très élevés et contaminent les eaux potables (Jensen et al. 2003; Crews et Peoples 2004).



Annexe 7: Classeur séparé des relevés au champ