

Conception pas à pas et évaluation de systèmes innovants en grande culture: quels enseignements de 20 ans d'essais de La Cage ?

Exposé fait par :
JM Meynard

Travaux successivement coordonnés par :

B Mille & P. Saulas, puis M. Bertrand & G. Grandeau,

Réalisés avec l'appui de

l'Unité Expérimentale INRA Grande Culture Versailles-Grignon

Et des directeurs de l'UMR d'Agronomie:

SOMMAIRE

- ❖ **Objectifs à l'implantation de l'essai, dispositif expérimental**
- ❖ **Quelles performances et quelle évolution des systèmes testés?**
- ❖ **De nombreuses études analytiques ont valorisé cette situation patrimoniale**
- ❖ **Conclusion**

Objectifs à l'implantation de l'essai

Dispositif expérimental

Objectifs à l'implantation de l'essai (1997)

Explorer et tester de nouveaux systèmes de culture:

- mise au point de prototypes,
- preuve de concept

Pour différents défis:

- Pour baisser les intrants (pesticides en particulier) sans changer la rotation (jusqu'où est-ce possible? Est ce durable?)
- Pour cultiver sans travail du sol avec une couverture vivante permanente (est ce possible? Comment adapter les techniques?)
- Pour développer le bio en grande culture sans élevage (très rare à l'époque)

Les acquis des équipes impliquées en 1996

Les acquis des équipes d'Agronomie et de Pathologie de Grignon:

- Itinéraires techniques du blé bas intrants
- Associations variétales en blé
- Itinéraires techniques du pois et du colza
- Effets précédents (effet azote, structure du sol, pathogènes telluriques, adventices..)

Les orientations:

- Le blé, culture privilégiée (programmes en cours, importance économique)
- Un développement des travaux sur le pluri-annuel (expérience pionnière sur la Protection intégrée, compétences en construction sur Agriculture de conservation et AB, retenus comme cas d'étude privilégiés)
- Un intérêt affirmé de l'équipe de Sciences du Sol de Versailles pour les différenciations de sol créées au sein de l'essai

4 systèmes de culture :

- **Un système productif**, visant une maximisation de la marge par le biais de la maximisation des rendements, inspiré des pratiques régionales dominantes (Productif)
- **Un système à utilisation réduite d'intrants**, en particulier pesticides et engrais azoté (BNI): la baisse de l'objectif de rendement permet de maintenir la marge et de réduire les nuisances environnementales
- **Un système sans travail du sol avec maintien permanent d'un couvert végétal (SCV)**
- **Un système conforme au cahier des charges de l'agriculture biologique (BIO)**

Ce qui est commun aux 4 systèmes:

- Grande culture sans élevage
- Des rotations de base de 4 ans (pour Productif, BNI et SCV au moins)
- 50% de blé d'hiver dans tous les systèmes
- Conduite par des règles de décision évolutives

Exemple des règles de décision pour le choix de la densité de semis du blé

Formulation des règles de décision:

Un objectif : « *but à atteindre ?* »

Une solution : « *comment faire ?* »

Si... alors; sinon...

Un critère d'évaluation : « *est-ce que ça marche ?* »

PRODUCTIF	
<p><i>Objectifs : avoir une densité élevée pour atteindre l'objectif de rendement</i> <i>Solutions :</i> adapté la dose de semis en fonction du poids de 1000 grains et de la faculté germinative pour obtenir une densité de 260 grains/m² . Dose de semis augmentée de 10% en mauvaises conditions, de 20% en très mauvaises conditions. <i>Evaluation :</i> notation du nombre de plantes levée au m².</p>	
INTEGRE	
<p><i>Objectifs : avoir une densité faible pour limiter les risques de maladies et de verse.</i> <i>Solutions :</i> adapté la dose de semis en fonction du poids de 1000 grains et de la faculté germinative pour obtenir une densité de 165 grains/m² . Dose de semis augmenté de 10% en mauvaises conditions, de 20% en très mauvaises conditions. <i>Evaluation :</i> notation du nombre de plantes levée au m².</p>	
NON TRAVAIL DU SOL	
<p><i>Objectifs : avoir une densité faible pour limiter les risques de maladies et de verse.</i> <i>Solutions:</i> adapté la dose de semis en fonction du poids de 1000 grains et de la faculté germinative pour obtenir une densité de 220 grains/m² . Dose de semis augmenté de 10% en mauvaises conditions, de 20% en très mauvaises conditions. <i>Evaluation :</i> notation du nombre de plantes levée au m².</p>	
BIOLOGIQUE	
<p><i>Objectifs :avoir une densité forte pour lutter contre les adventices.</i> <i>Solutions :</i> adapté la dose de semis en fonction du poids de 1000 grains et de la faculté germinative pour obtenir une densité de 450 grains/m² . Dose de semis augmenté de 10% en mauvaises conditions, de 20% en très mauvaises conditions. <i>Evaluation :</i> notation du nombre de plantes levée au m².</p>	

Des règles de décision évolutives: principes de la conception pas à pas

- **Tous les ans**, évaluation des résultats obtenus sur un petit nombre d'indicateurs majeurs (rendement, IFT, marges)
- **Si le résultat obtenu n'est pas satisfaisant**, réalisation d'un diagnostic: à quoi est-ce dû ?
- **Si un problème est jugé grave** (performances réitérées), le diagnostic permet d'identifier la ou les choix techniques qui posent problème.
- **Différentes alternatives à ces choix techniques sont alors mises en débat** dans le groupe de pilotage de l'expérimentation, de nouvelles règles de décision sont formulées et mises en œuvre
- **Les systèmes évoluent sous l'effet d'une dynamique d'apprentissage**

Des règles de décision évolutives: principes de la conception pas à pas

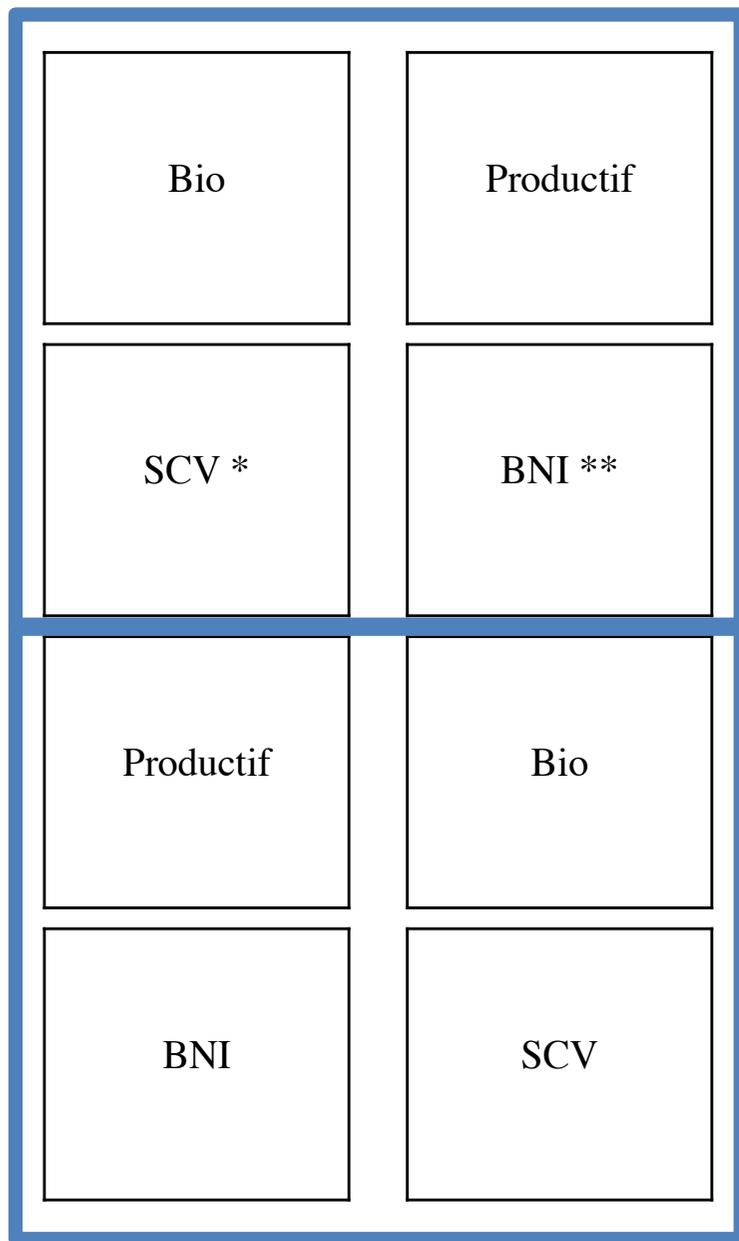
- **Pour les systèmes Productif et bas niveau d'intrants (BNI):** des changements de règles de décision assez limités (choix des variétés, introduction associations variétales, valorisation du BSV, ...)
- **Pour SCV et BIO,** des changements importants :
 - pour SCV, changement de plante de couverture, remplacement du maïs par du colza, ...
 - Pour BIO, changement complet de rotation, de modalités de gestion de l'azote et des adventices

Dispositif expérimental



Parc du Château de Versailles
Limon profonds
Drainage ancien

Dispositif expérimental

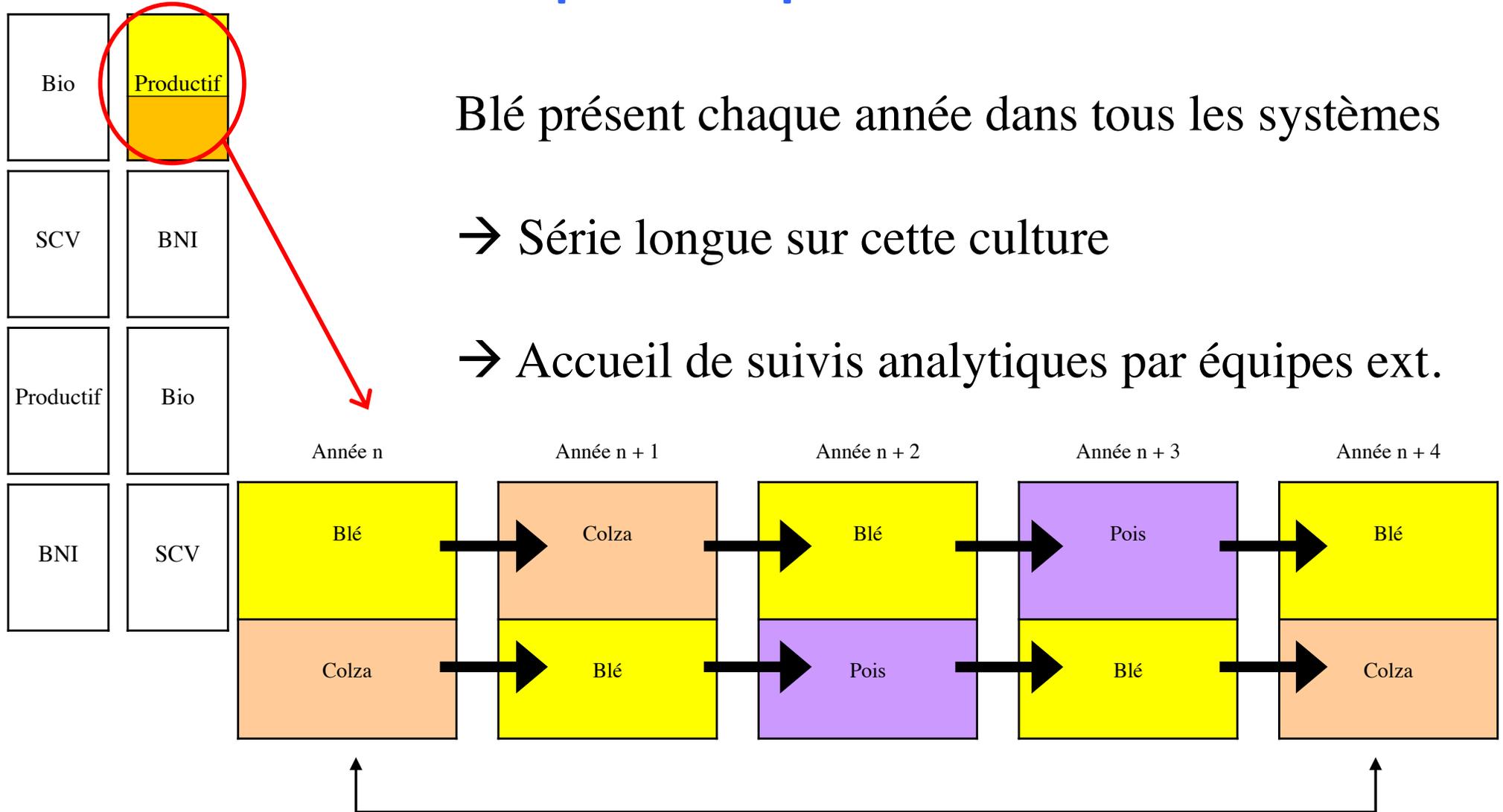


Parcelle de 12 ha
Surface totale de l'essai 8 ha
2 répétitions

* Système sous couvert végétal

** Système bas niveau d'intrants

Dispositif expérimental



Blé présent chaque année dans tous les systèmes

→ Série longue sur cette culture

→ Accueil de suivis analytiques par équipes ext.

Quelles performances et quelle évolution des systèmes testés ?

- **Les 3 autres systèmes sont comparés au PRODUCTIF**
- **Présentation de la logique agronomique des systèmes**
- **Puis présentation de la chronologie des rendements, en relation avec les changements de règles de décision**
- **Puis présentation des teneurs en protéines du blé, IFT, marges semi-nettes (calculs réalisés pour des prix moyens, Blé conventionnel 160 €/t, colza 360 €/t, pois 220 €/t, blé bio 370 €/t)**
- **Renvoi à cet après midi pour résultats sur le stockage du C et la biodiversité, ainsi que pour un approfondissement sur la réduction des pesticides**

Logique agronomique du BNI, comparé au PRODUCTIF

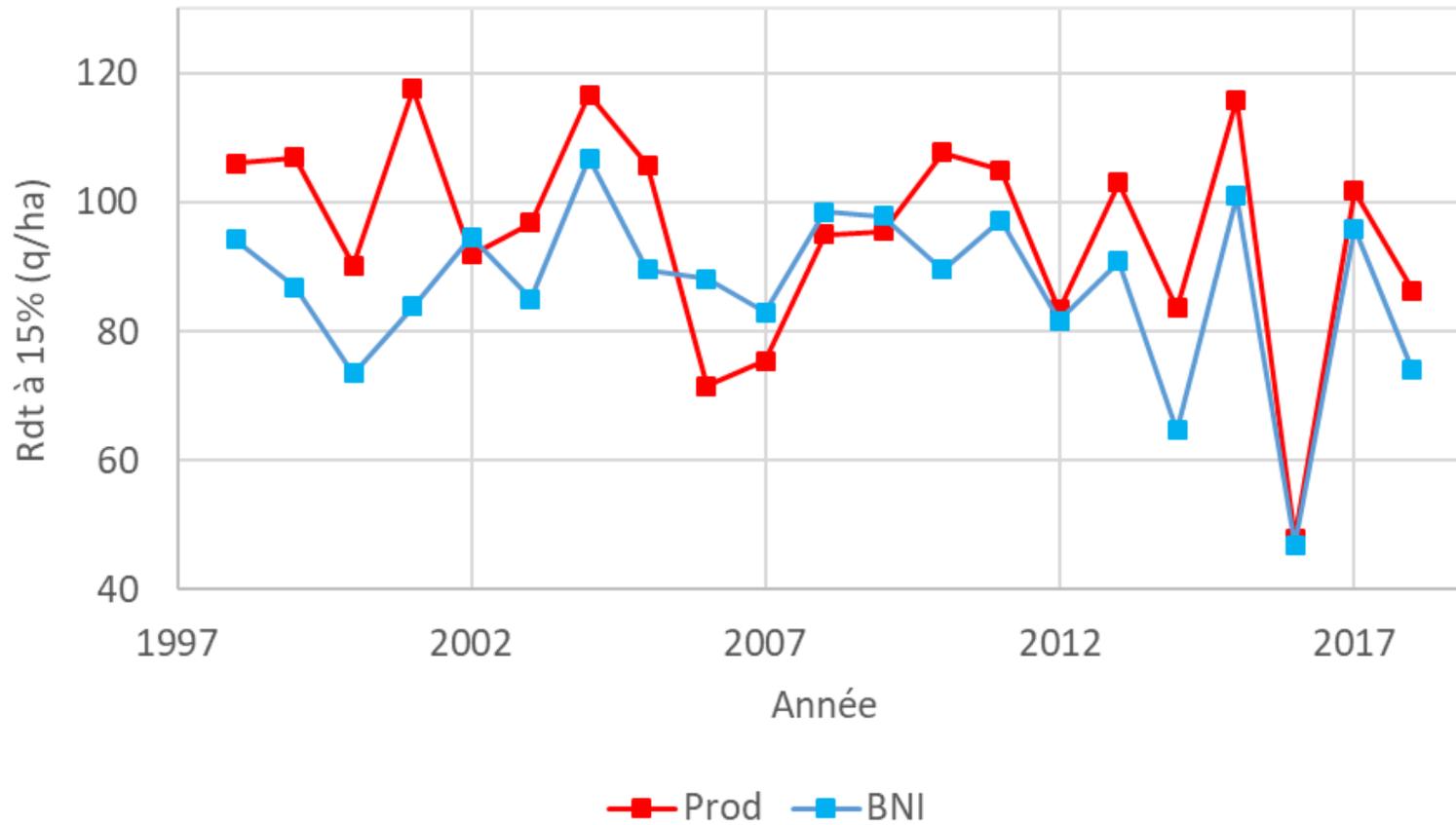
- ➔ **Objectif du BNI:** baisse des intrants, en particulier pesticides et azote (meilleure valorisation de l'engrais et limitation des reliquats récolte)
- ➔ **acceptation d'une baisse des rendements** du moment que la marge est maintenue
- ➔ **Même rotation Colza-Blé-Pois-Blé** en productif et BNI (ni Colza-blé-orge, ni rotation longue et diversifiée)

Changement profond de l'itinéraire technique du blé :

- ✓ Dates de semis plus tardives (après le 20 octobre au lieu de début octobre), densité plus faible (moins besoin d'azote, 0 raccourcisseur)
- ✓ Mélange de variétés, résistances complémentaires (moins protection fongicide)
- ✓ Réduction fertilisation N (diminution de l'objectif de rendement) et retard premier apport (pas d'N avant épi 1 cm, adoption d'APPI-N)
- ✓ Labour 1 an sur 2 pour éviter les remontées d'inoculum ou de graines d'adventices

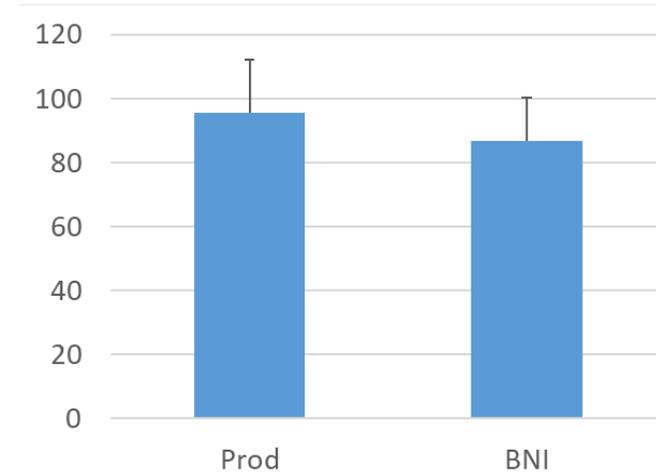
Des actions plus limitées sur les autres cultures : utilisation d'associations de variétés et baisse de la fertilisation N en colza, réduction de la protection fongicide sur pois et sur colza, désherbage mécanique

Rendements en blé

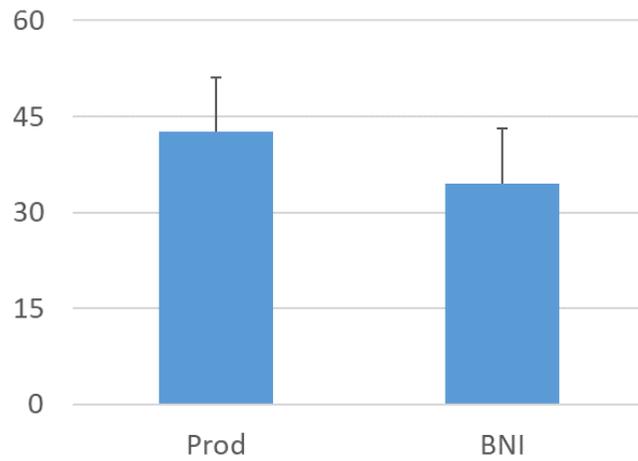


Niveaux de production: Rendements q/ha

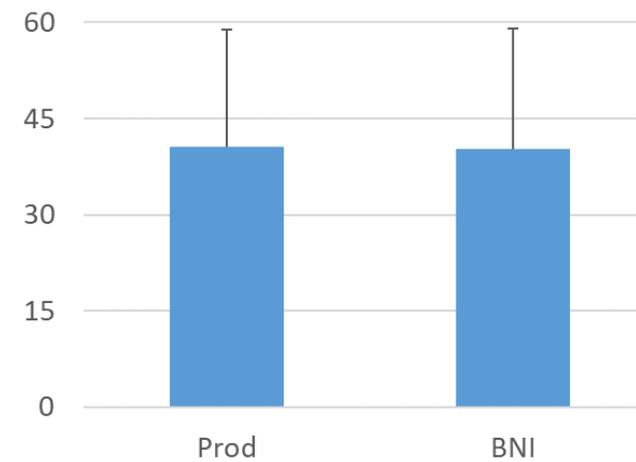
Blé : - 9%



Colza : - 19%

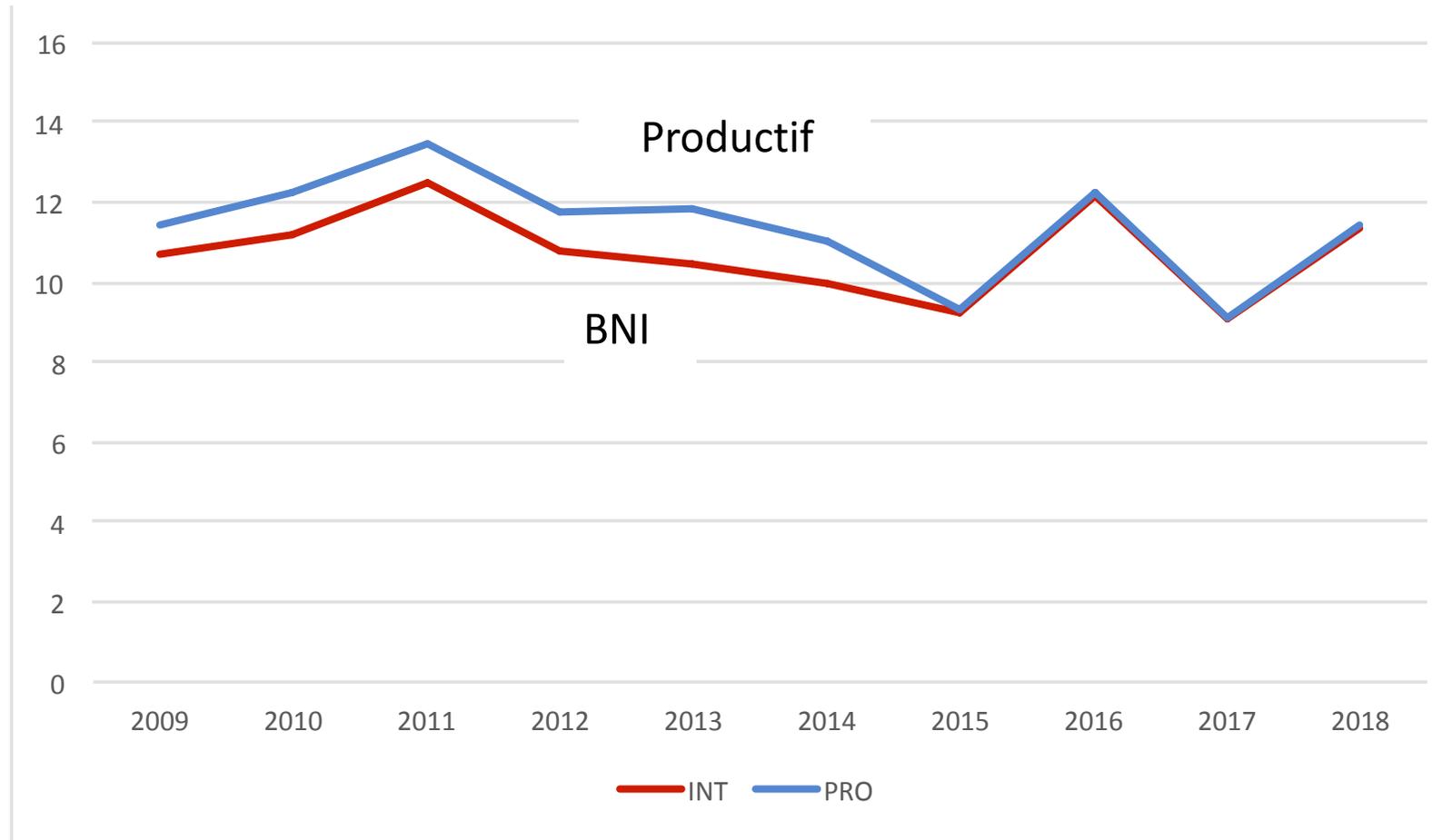


Pois : NS

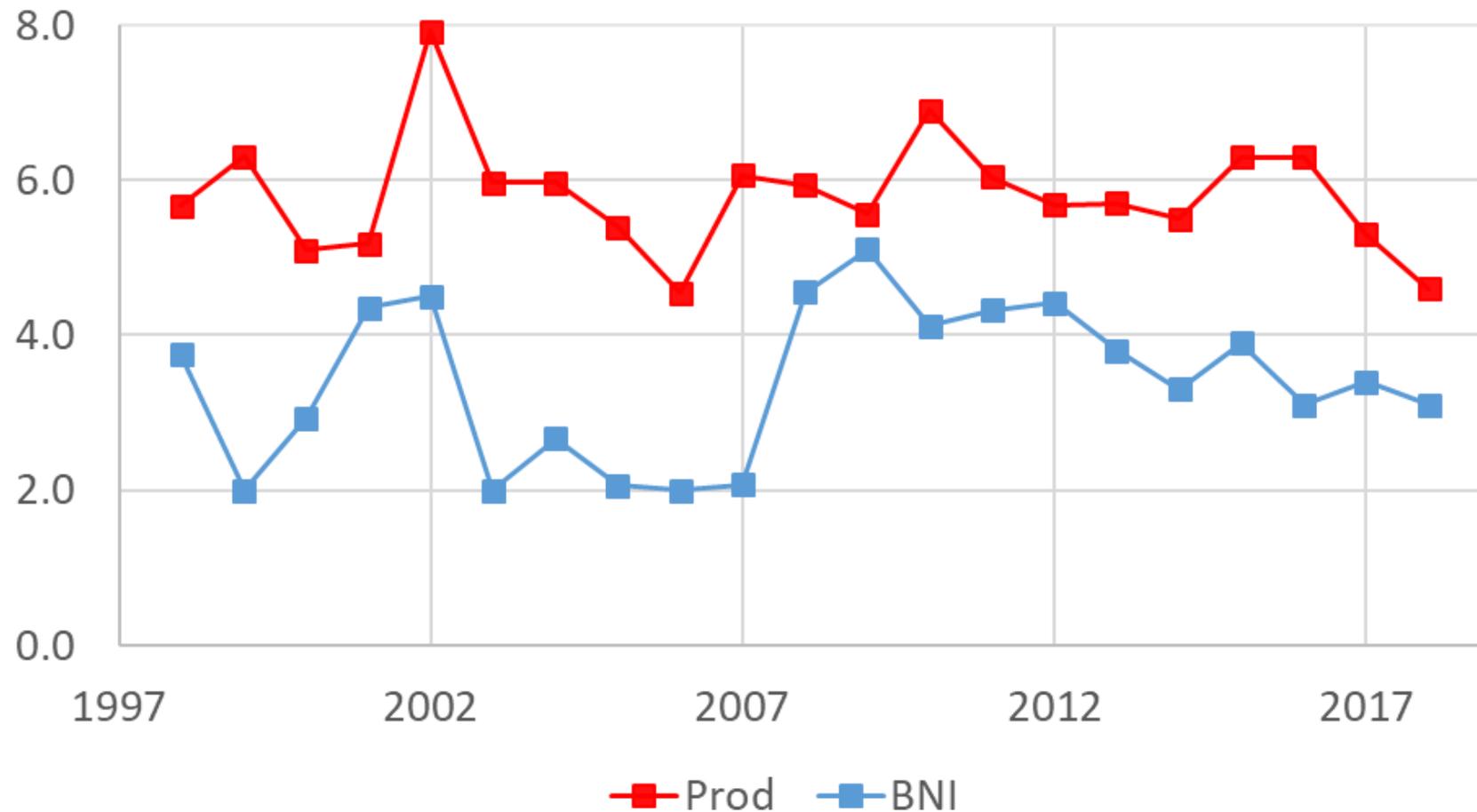


Une teneur en protéines du blé qui reste mal maîtrisée:

Marges de progrès pour l'avenir
en utilisant la méthode de fertilisation APPI-N



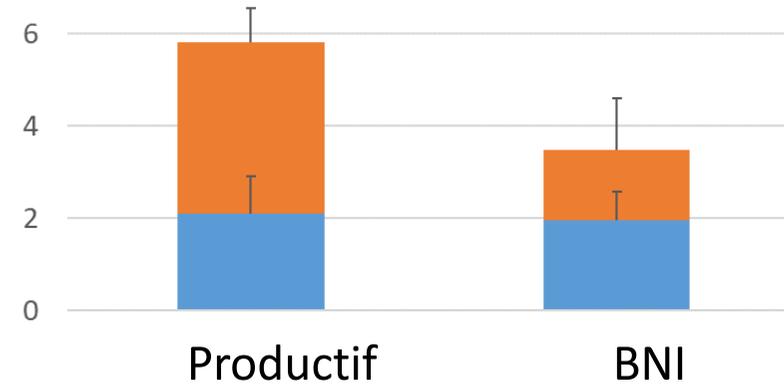
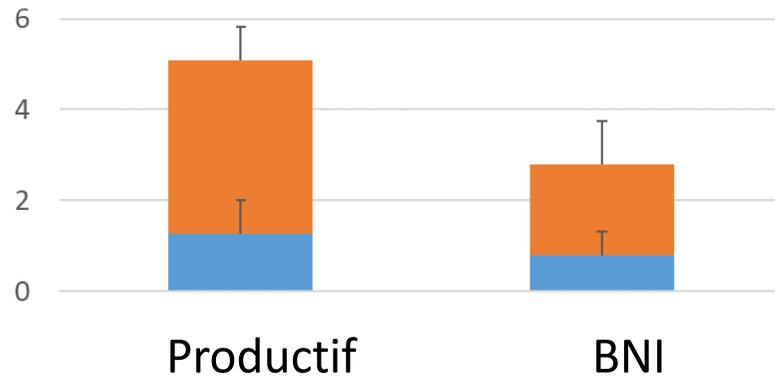
Evolution des IFT blé



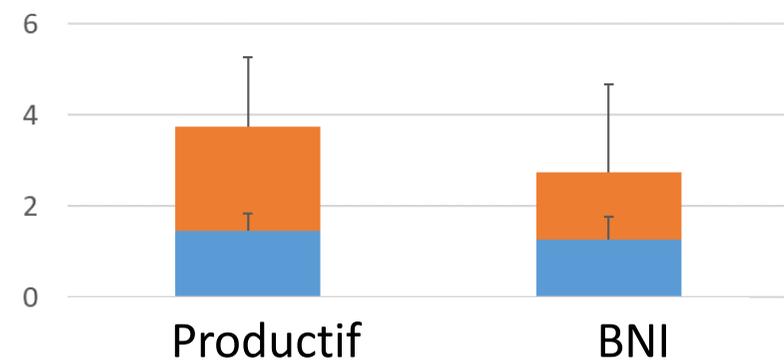
Valeurs moyennes des IFT

Blé : - 41%

Colza : - 46%



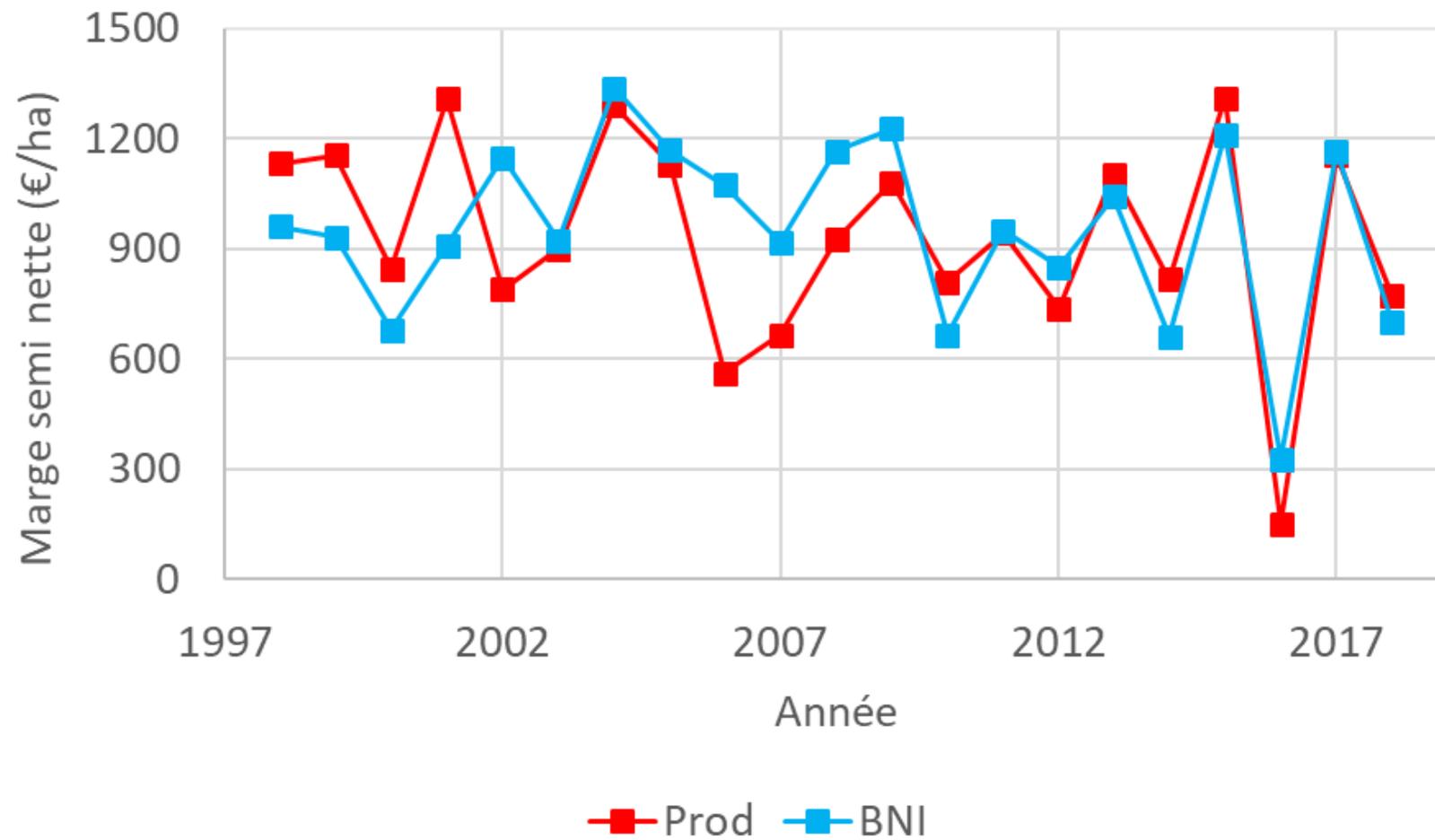
Pois : - 31%



IFT Herbicides
IFT hors herbicides

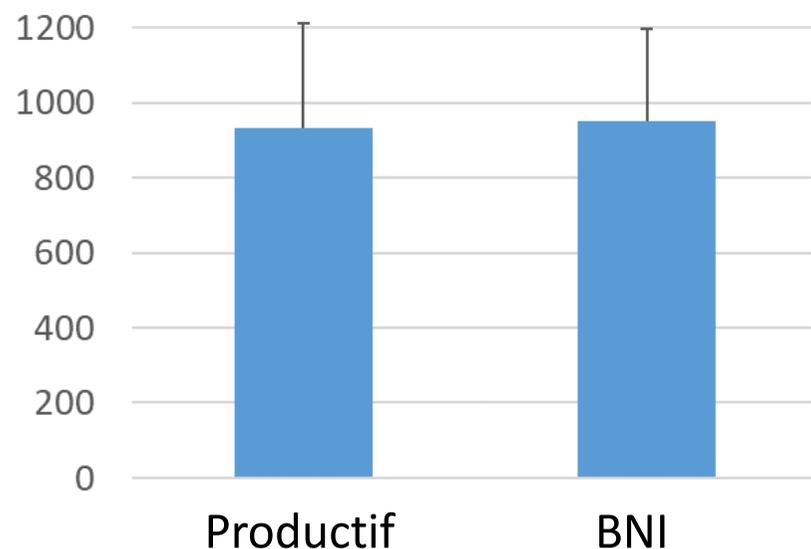


Evolution des marges semi-nettes sur blé

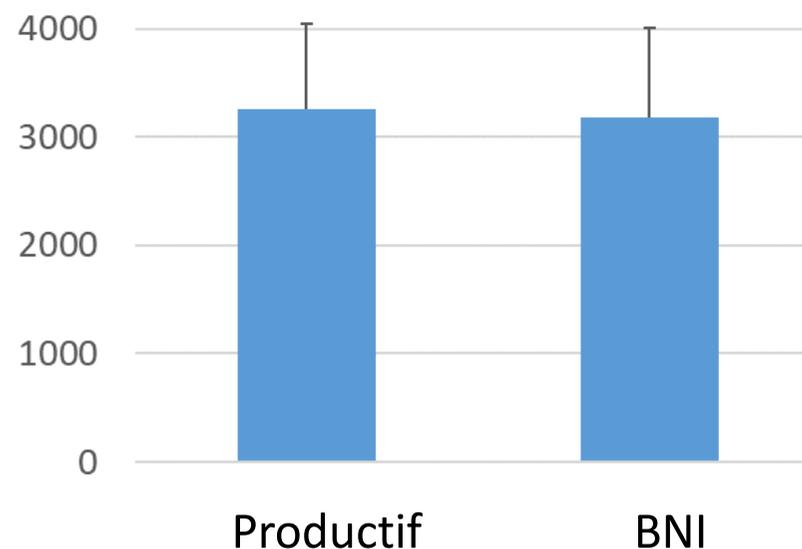


Valeurs moyennes des marges semi-nettes (€/ha)

Sur le blé : NS



Sur la rotation : NS



Sur 20 ans: 20 €/ha d'écart sur le blé en faveur du BNI, 73 €/ha d'écart sur la rotation en faveur du PRODUCTIF
Même niveau de variabilité

Conclusion

sur le système Bas Niveau d'Intrants

- **Confirmation du fait que l'on sait maintenir la marge en baissant fortement les pesticides**
- **Pas de baisse tendancielle des rendements, ni d'augmentation des IFT**
- **Une teneur en protéines des grains de blé mal maîtrisée (changement de Règle de Décision d'apport d'azote en 2018)**
- **Une baisse forte des IFT, mais inférieure à 50%, car pas de réduction des herbicides (pas de désherbage mécanique, pas d'allongement de rotation)**

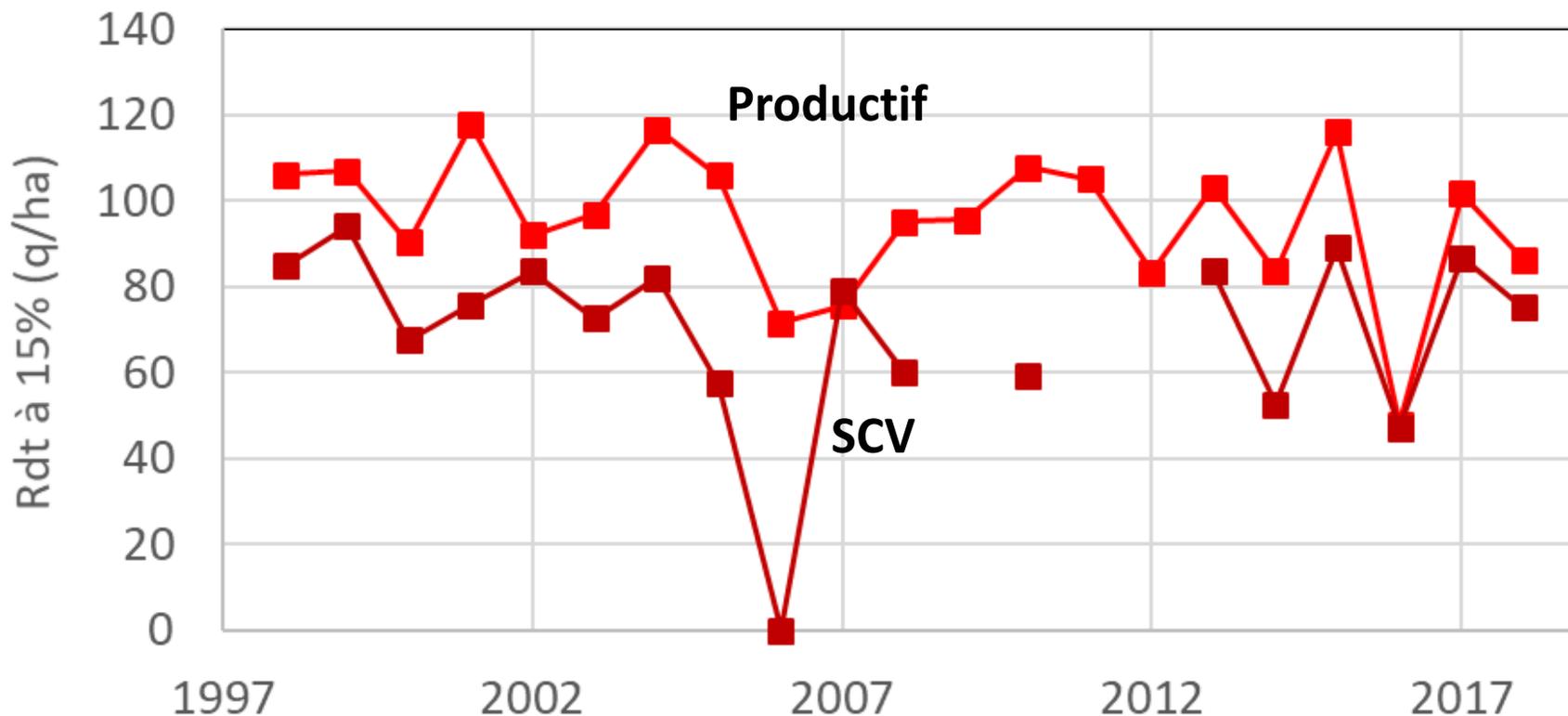
Logique agronomique du SCV, comparé au productif

- **Objectif du SCV:** explorer les potentialités et limites d'un système basé sur la suppression du travail du sol et le maintien d'une couverture vivante permanente
- Choix d'une plante de couverture sensée rester petite sous la culture principale et se développer après la récolte
 - Choix initial de la fétuque rouge comme plante de couverture
 - Rotation Maïs-Blé-Pois-Blé (choix du maïs pour avoir une interculture longue)
 - Conduite du blé: idem BNI

Phase 1 : Au lancement de l'essai implantation d'une fétuque rouge comme plante de couverture. Rotation Maïs-Blé-Pois-Blé

- Difficulté croissante de maîtrise de la fétuque, augmentation de l'utilisation d'herbicides, forte compétition avec la culture de rente
- Développement de piétin-échaudage sur blé (favorisé par la fétuque)
- Une année où le blé n'était pas récoltable
- Difficulté d'implantation du maïs et problème compétition, plusieurs cultures de maïs non récoltables
- → **constat d'échec après 8 années de test**

Rendements en blé

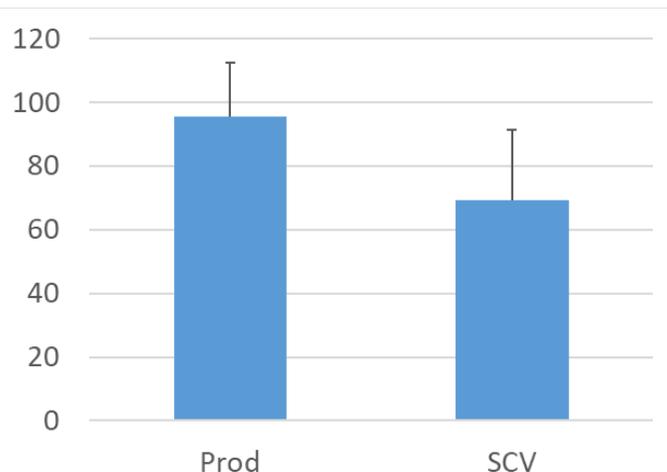


Phase de transition,
interruption de la rotation
par deux coupures de
luzerne pure

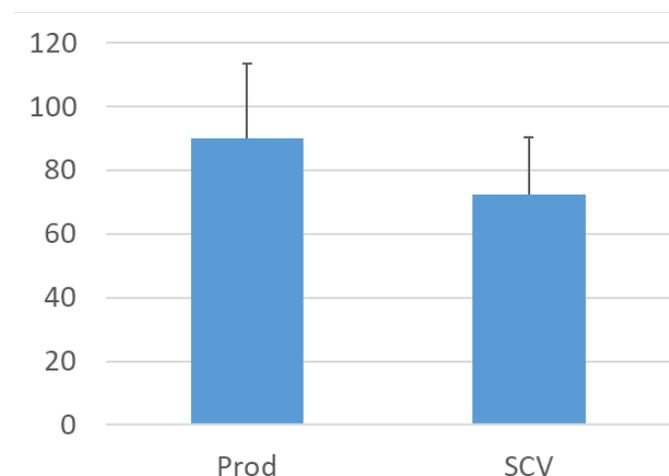
Rotation colza-blé-pois-blé
Luzerne en plante de
couverture sauf pendant
le cycle du pois

Niveaux de production: Rendements (q/ha)

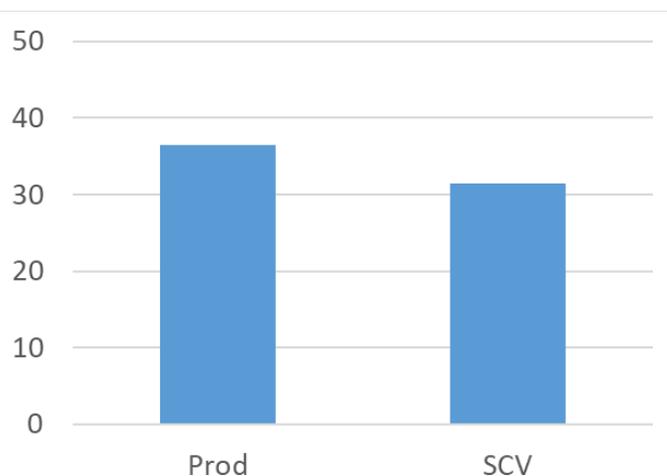
Blé tout l'essai : -28%



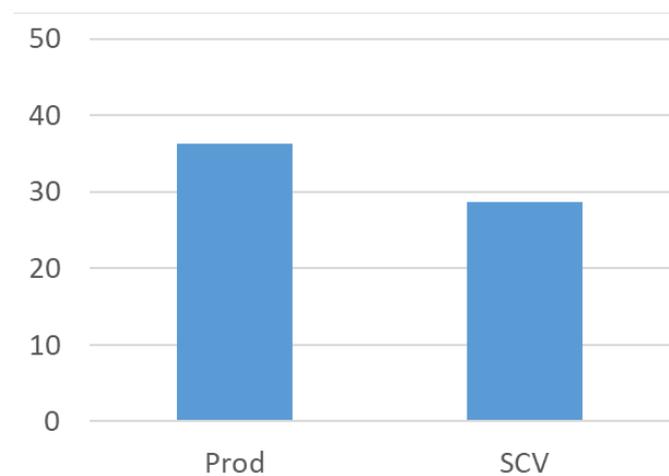
Blé phase 3 : -19%



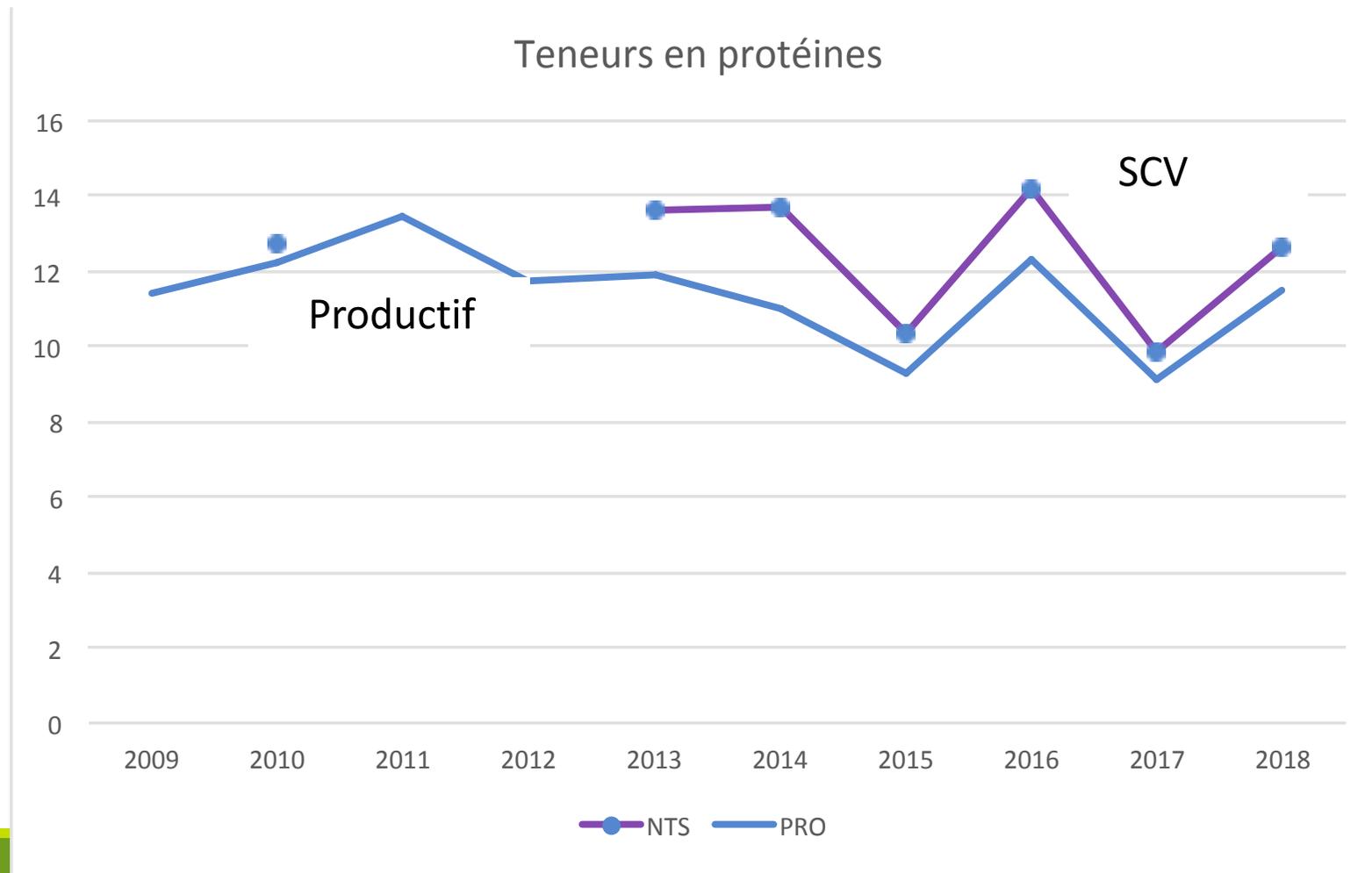
Colza phase 3: -14%



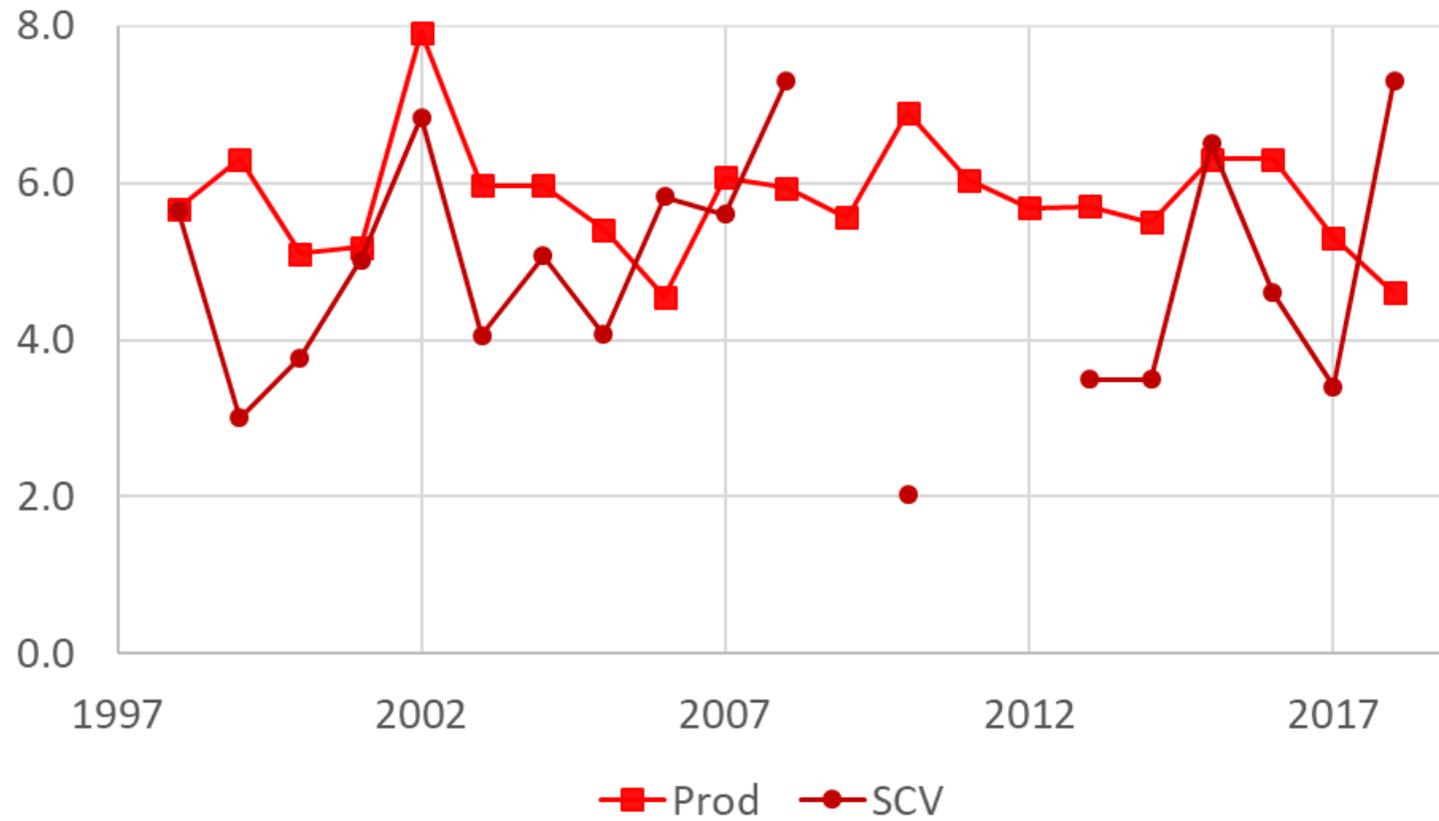
Pois phase 3 : -21%



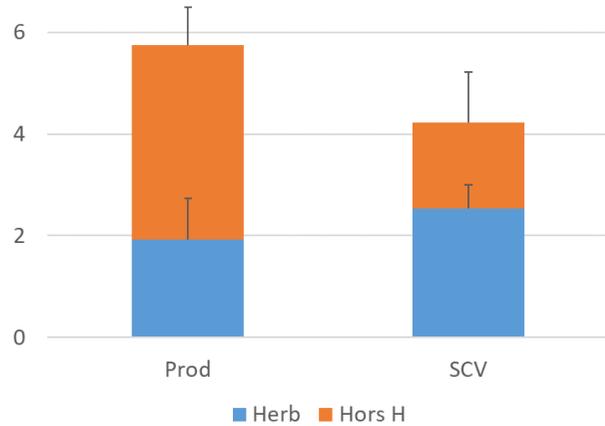
Pendant la phase 3, la teneur en protéines du blé est améliorée par l'association avec la luzerne, malgré une baisse de fertilisation analogue au BNI :
Marges de progrès pour l'avenir
en utilisant la méthode de fertilisation APPI-N



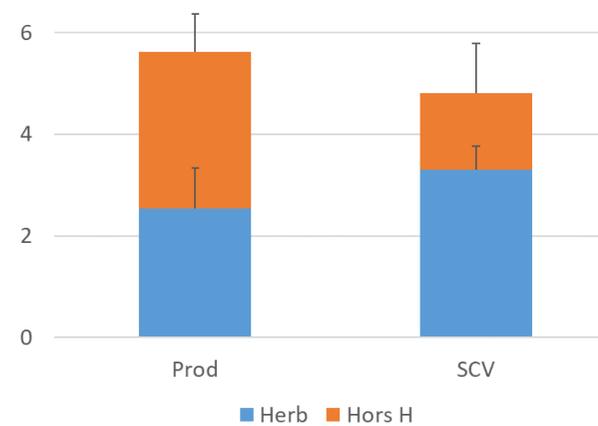
Evolution des IFT blé



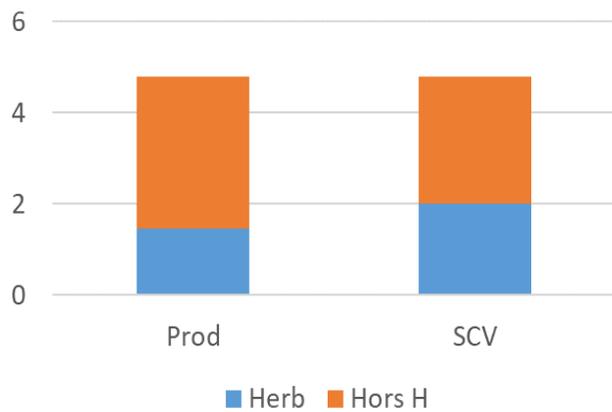
Blé tout l'essai : -26%



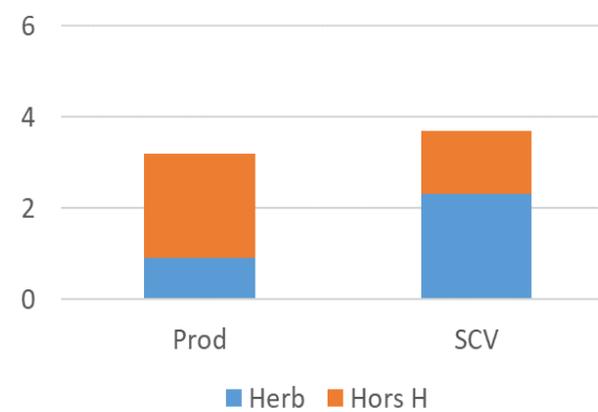
Blé phase 3 : -15%



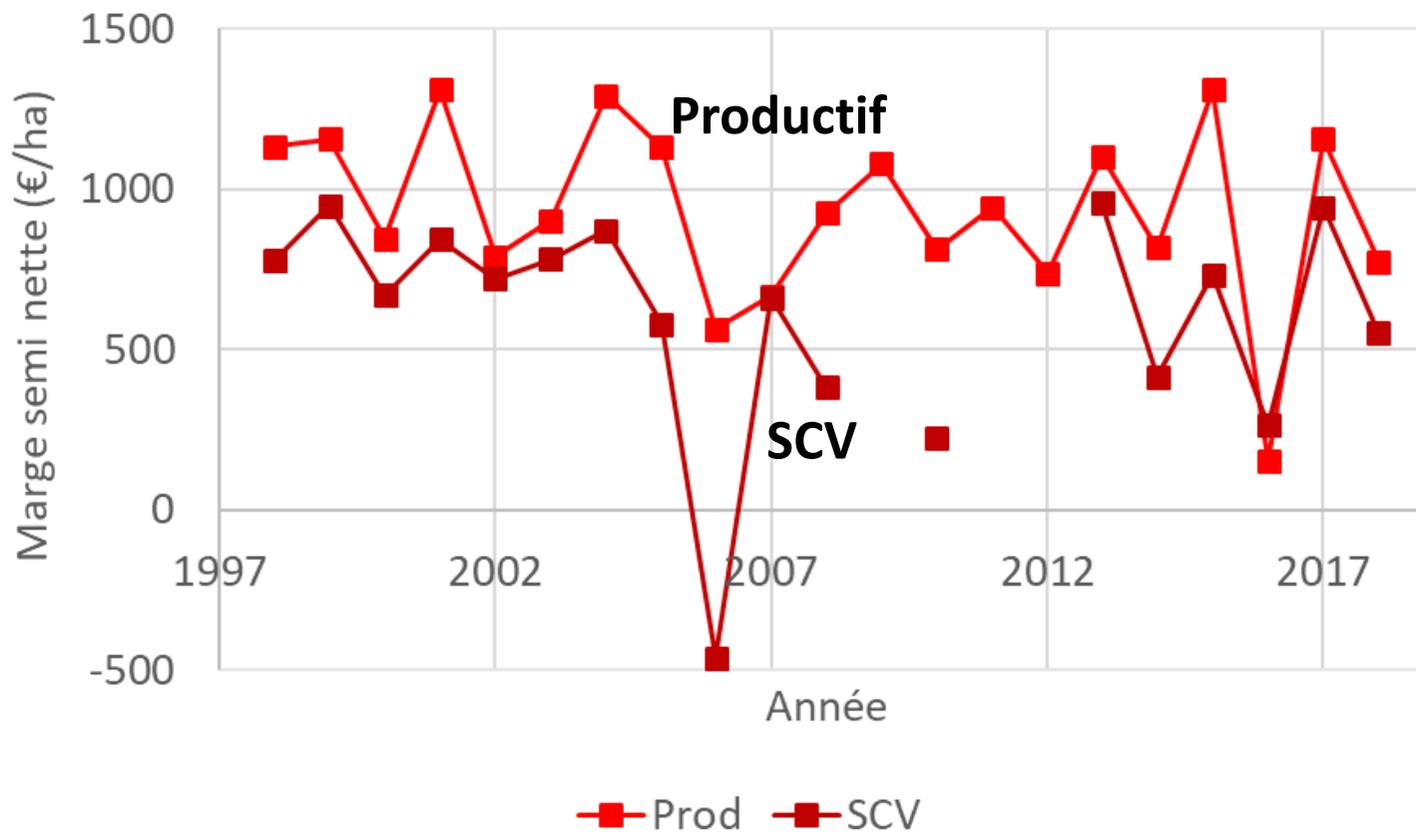
Colza phase 3: 0%



Pois phase 3 : +16%

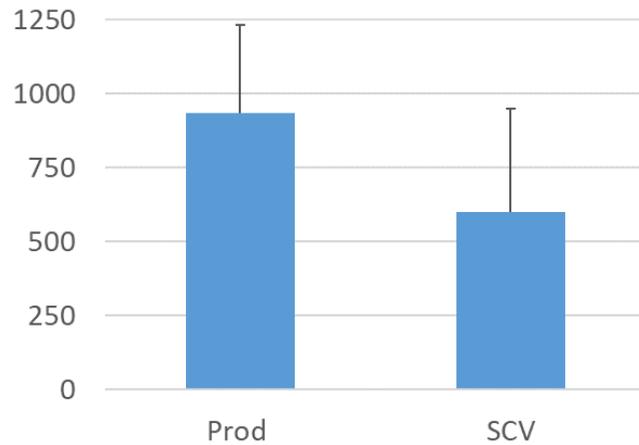


Evolution des marges semi-nettes sur blé

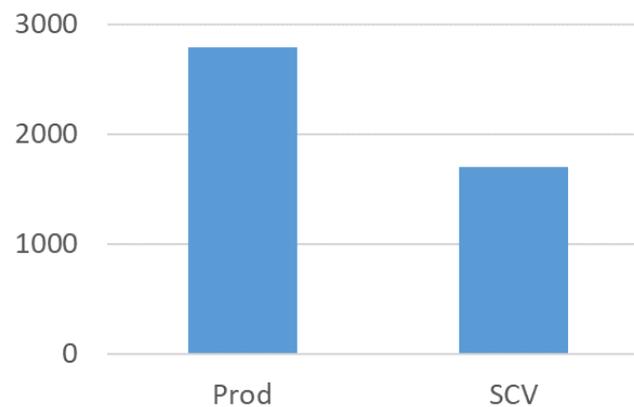
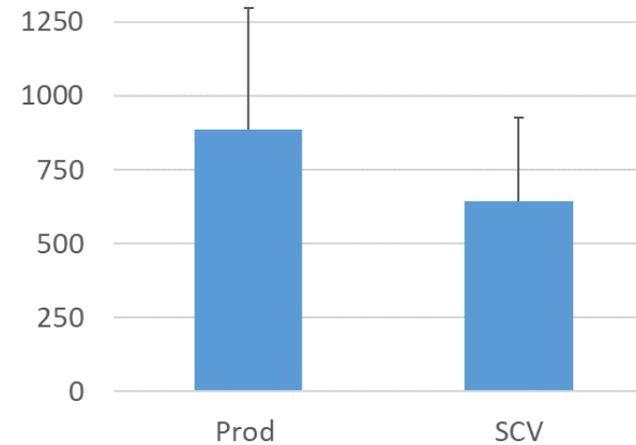


Valeurs moyennes des marges semi-nettes (€/ha)

Blé tout l'essai : -36%



Blé sur phase 3 : -26%



Rotation phase 3 : -36%

Conclusion

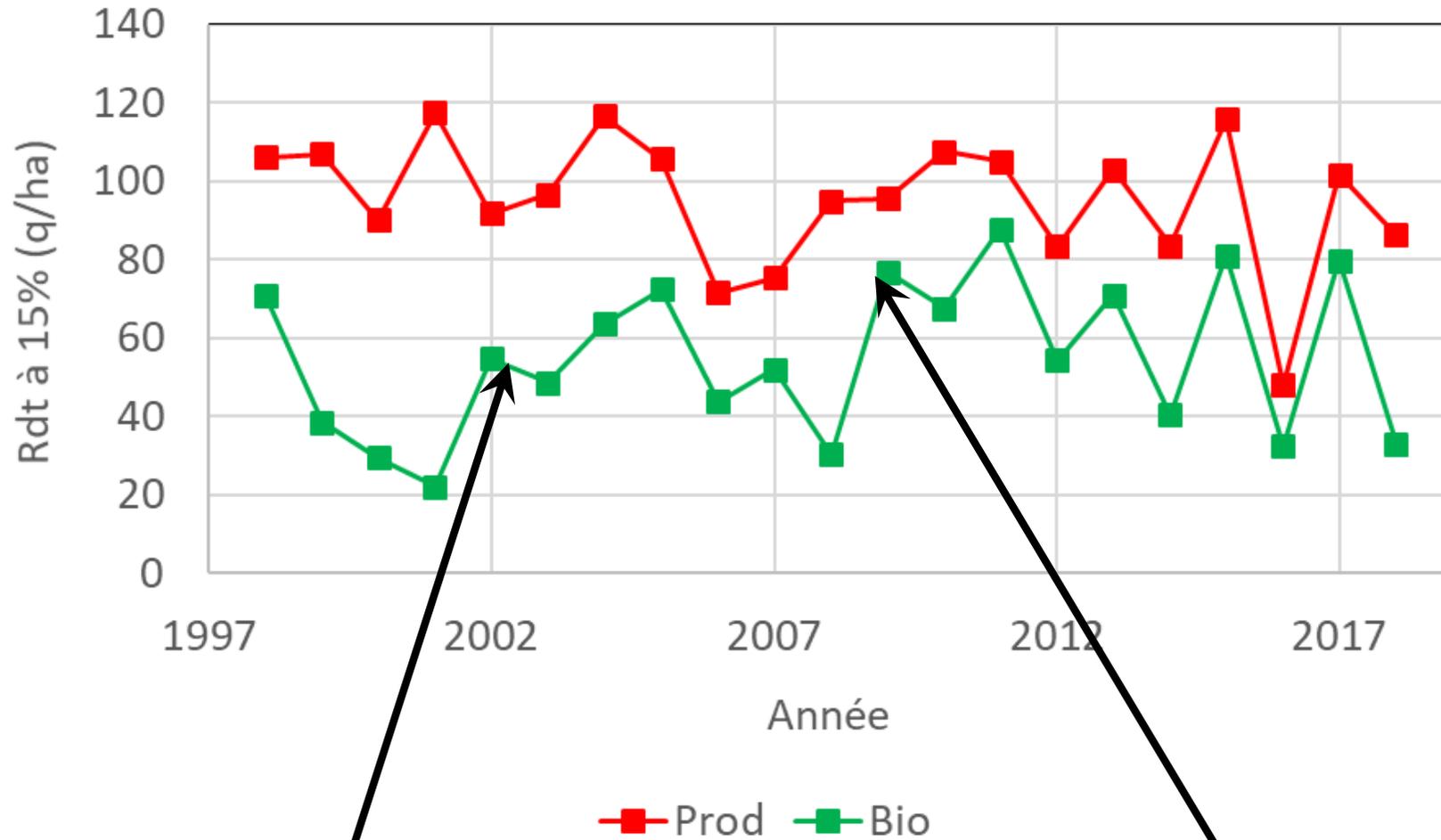
sur le système Semis sous couvert vivant (SCV)

- **Un concept de mode de culture très mal connu: l'expérimentation a permis d'en cerner les points fort et les points faibles**
- **Une difficulté à réguler la compétition par le couvert vivant (luzerne mieux que fétuque rouge) ; on sait éviter les cas de zéro récolte, mais pas les réductions de production**
- **Des marges semi-nettes fortement réduites**
- **Un système qui reste très dépendant des herbicides, et en particulier du glyphosate: pas acceptable**
- **Points forts: réduction du travail, de la consommation d'énergie fossile, stockage du carbone, accroissement de l'activité biologique du sol**

Logique agronomique du système Bio

- ➔ **Objectif du système Bio:** explorer les potentialités et limites d'un système de grande culture bio sans élevage, sans apport de matières organiques exogènes
 - **Priorité 1 à l'alimentation en N:** rotation fortement chargée en légumineuses (soja, lupin, aujourd'hui luzerne)
 - **Priorité 1 bis à la lutte contre les adventices:** jouer la compétitivité du blé (semis tardif, forte densité, alimentation en azote); désherbage mécanique (abandon de la herse étrille en sol battant, binage avec semis adapté)
 - **Priorité 2 au contrôle des maladies aériennes:** Associations variétales
- ➔ Une rotation qui a eu du mal à se stabiliser (essai de colza, soja, lupin...)
- ➔ Un développement croissant des adventices: chardon, rumex, ray grass, vulpin
- ➔ En 2002, introduction de la luzerne; en 2009, la rotation devient « 2 ans de luzerne-blé-blé ». 1^{ère} et 3^{ème} coupes de luzerne broyées et laissées dans la parcelle; deuxième coupe fanée pour les animaux d'AgroParisTech.
- ➔ La luzerne permet de bien maîtriser les adventives dans le blé qui suit; le second blé obtient un rendement plus faible, avec un développement du ray grass et du vulpin; bonne maîtrise des vivaces.

Rendements en blé (q/ha)

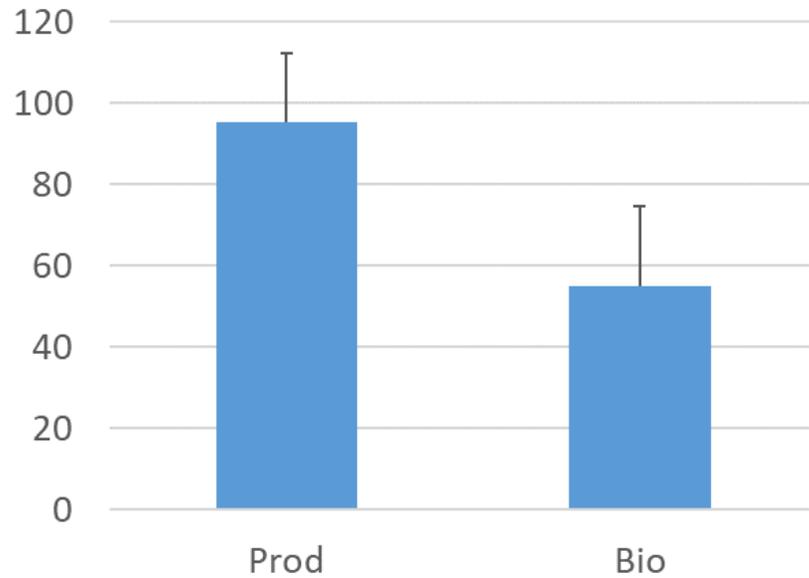


Introduction de la luzerne

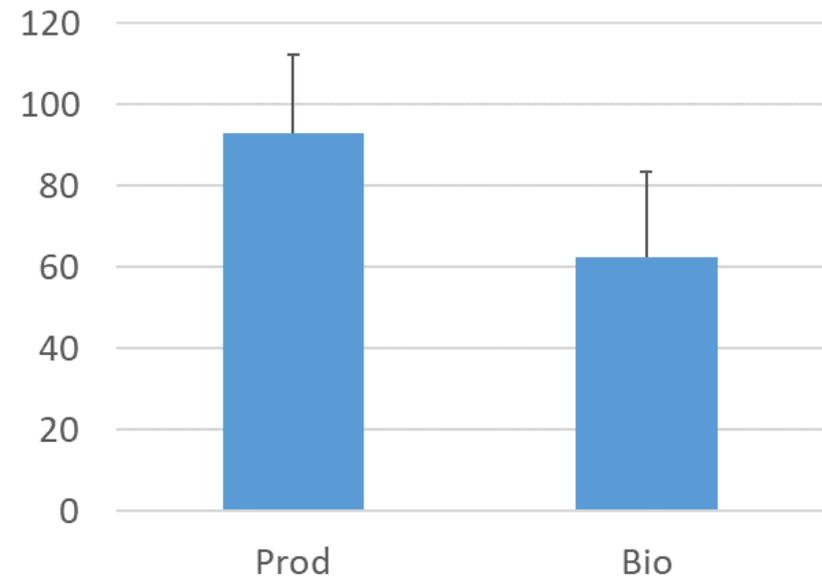
Mise en place de la rotation luzerne-luzerne blé blé

Niveaux de production : Rendements (q/ha)

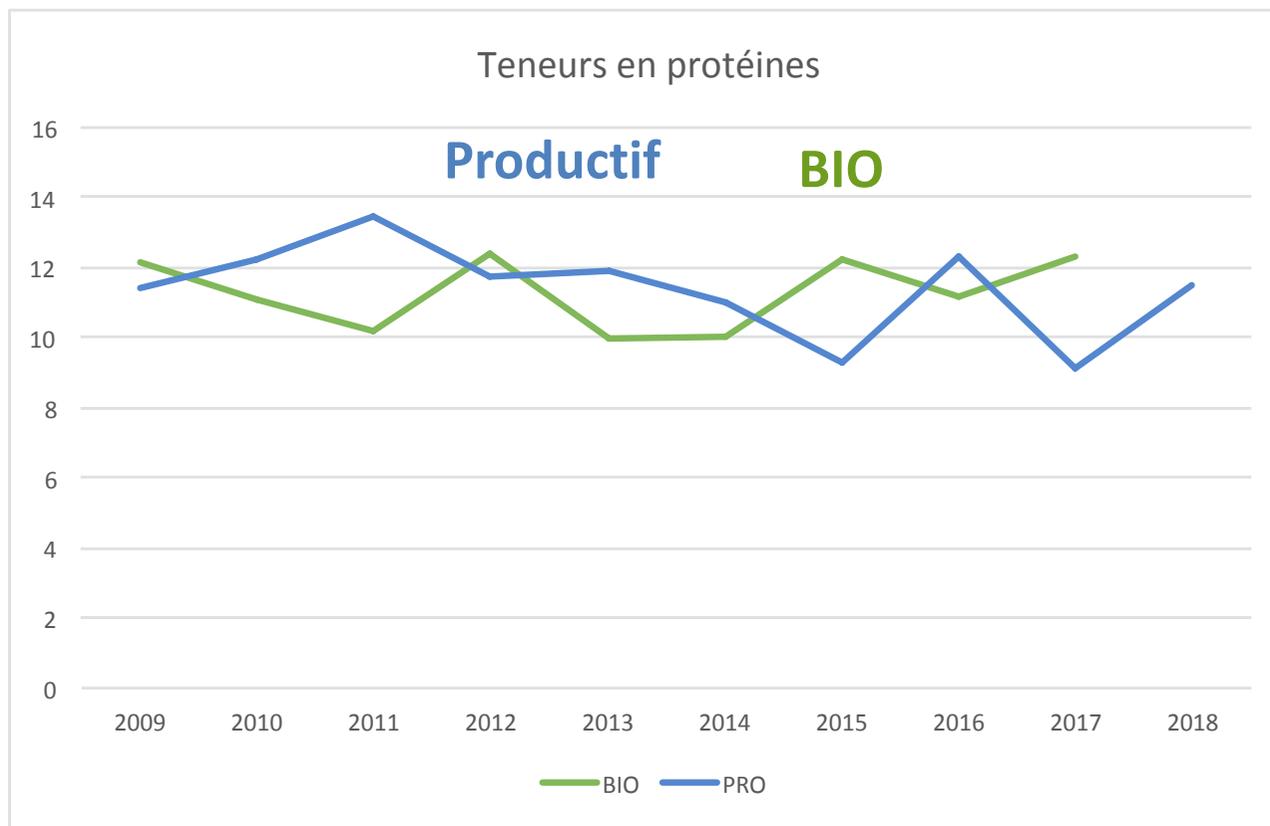
Blé tout l'essai : -43%



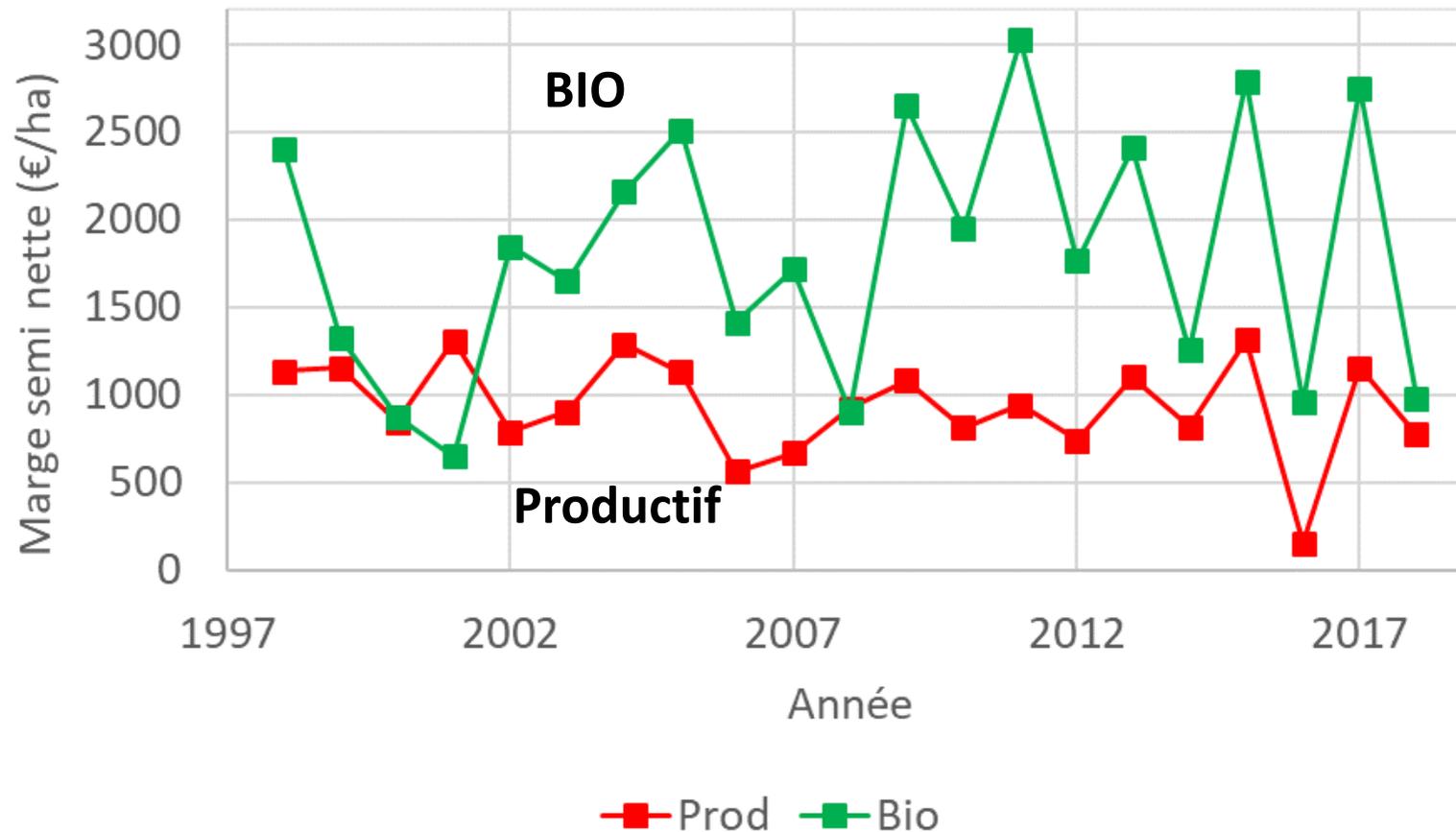
Blé rotation L/L/B/B : -33%



Avec la rotation LLBB, la teneur en protéines du blé en bio fait jeu égal avec le système productif



Evolution des marges semi-nettes sur blé

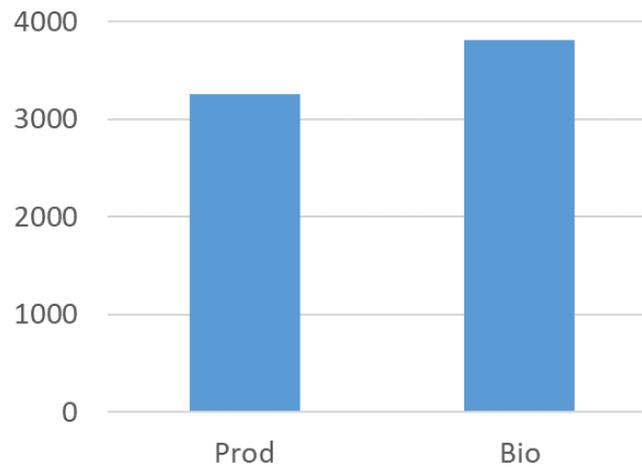
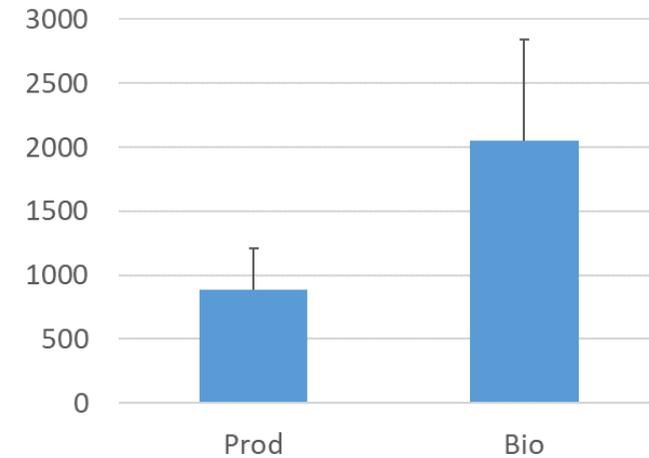
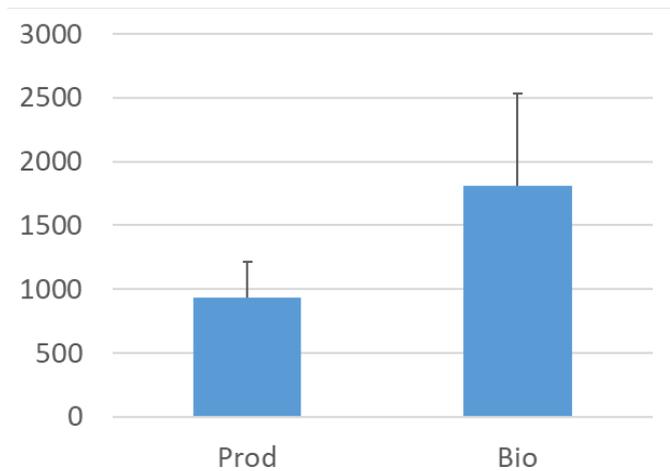


A partir de 2009, les marges en dents de scie traduisent l'alternance entre résultats du premier blé et du second blé. Attention à la baisse des marges sur le second blé!

Valeurs moyennes des marges semi-nettes (€/ha)

Blé tout l'essai : + 94 %

Blé rotation L/L/B/B : + 131%



Rotation L/L/B/B :
+ 17%

Conclusion sur le système Grande culture Bio

- **Exploration d'un bio atypique, basé sur une rotation courte: est-il durable (cf baisse de rendement et de marge du second blé)? Quelles conséquences macro (terres utilisées pour la production seulement 1 an /2)?**
- **La meilleure marge de l'essai, grâce au prix du blé bio, mais aussi aux rendements élevés obtenus en blé de luzerne. La rentabilité serait améliorée si on valorisait la luzerne (alimentation animale, extraction de protéines...)**
- **Un système favorable au stockage de carbone et à l'activité biologique du sol.**
- **Malgré les limites de ce système, important de l'explorer dans nos essais pour faire un bilan complet de ce qu'on gagne et de ce qu'on perd avec ce type de solution. Il serait intéressant de comparer à un système bio en rotation longue, exploitant les vertus des associations complexes.**

**De nombreuses études analytiques ont
valorisé cette situation patrimoniale**

Liste des publications ayant utilisé l'essai (1/5)

Sur la méthodologie de l'expérimentation, et/ou l'évaluation de systèmes de culture

- Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.-M., Faloya V., Saulas P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29 : 73–86.
- Hossard, L; Philibert, A; Bertrand, M; Colnenne-David, C; Debaeke, P; Munier-Jolain, N; Jeuffroy, M H; Richard, G; Makowski, D, 2014. Effects of halving pesticide use on wheat production. *Scientific reports* 4 : 4405.
- Hossard, L., Archer, D.W., Bertrand, M., Colnenne-David, C., Debaeke, P., Ernfors, M., Jeuffroy, M.H., Munier-Jolain, N., Nilsson, C., Sanford, G.R., Snapp, S.S., Jensen, E.S., Makowski, D., 2016. A meta-analysis of maize and wheat yields in low-input vs. conventional and organic systems. *Agronomy Journal*, 108, 3, 1-13.
- Lechenet M., Deytieux V., ... Munier-Jolain N., 2017. Diversity of methodologies to experiment Integrated Pest Management in arable cropping systems: analysis and reflections based on a European network. *European Journal of Agronomy* 83 (2017) 86-99

Liste des publications ayant utilisé l'essai (2/5)

Sur la biodiversité des organismes du sol

- Pelosi C., Bertrand M., Capowiez Y., Boizard H., Roger-Estrade J., 2009. Earthworm collection from agricultural fields: Comparisons of selected expellants in presence/absence of hand-sorting. *Eur. J. Soil Biol.* 45, 176–183, DOI: 10.1016/j.ejsobi.2008.09.013
- Pelosi C., Bertrand M., Roger-Estrade J., 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.*, 29 : 287-295, DOI: 10.1051/agro/2008069
- Pelosi C., Pey B., Hedde M., Caro G., Capowiez Y., Guernion M., Peigné J., Piron D., Bertrand M., Cluzeau D., 2014. Reducing tillage in cultivated fields increases earthworm functional diversity. *Appl. Soil Ecol.*, 83, 79-87. DOI: 10.1016/j.apsoil.2013.10.005
- Henneron L., Bernard L., Hedde M., Pelosi C., Villenave C., Chenu C., Bertrand M., Girardin C., Blanchart E., 2015. Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agron. Sustain. Dev.*, 35 : 169–181, DOI: 10.1007/s13593-014-0215-8

Liste des publications ayant utilisé l'essai (3/5)

Sur la biodiversité des organismes du sol - suite

- Pelosi C., Bertrand M., Thénard J., Mougin C., 2015. Earthworms in a 15 years agricultural trial. *Appl. Soil Ecol.* 88 : 1–8. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.12.004
- Ricci F., Bentze L., Montagne D., Houot S., Bertrand M., Pelosi C., 2015. Positive effects of alternative cropping systems on terrestrial Oligochaeta (Clitellata, Annelida). *Soil Organisms*, 87 (2), 71-83.
- Pelosi C., Pey B., Caro G., Cluzeau D., Peigné J., Bertrand M., Hedde M., 2016. Dynamic of earthworm taxonomic and functional diversity in ploughed and no-tilled cropping systems. *Soil & Tillage Research* 156 (2016) 25–32.
- Pelosi C., Grandeau G., Capowiez Y., 2017. Temporal dynamics of earthworm-related macroporosity in tilled and non-tilled cropping systems. *Geoderma* 289,169-177.

Liste des publications ayant utilisé l'essai (4/5)

Sur la structure du sol, le stockage du Carbone et les émission de GES

- Chenu C., Abiven S., Annabi M., Barray S., Bertrand M., Bureau F., Cosentino D., Darboux F., Duval O., Fourrié L., Francou C., Houot S., Jolivet C., Laval K., Le Bissonnais Y., Lemée L., Menasseri S., Pétraud J.-P. Verbeque B., 2011. Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. *Etude et Gestion des sols*, 18 : 161-174
- Autret B., Mary B. , Chenu , Balabane M., Girardin C., Bertrand M., Grandeau G., Beaudoin N., 2016. Alternative arable cropping systems: A key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 232 (2016) 150–164.
- Autret B., Beaudoin B., Rakotovololona L., Bertrand M., Grandeau G., Gréhan E., Ferchaud F., Mary B., 2019. Can alternative cropping systems mitigate nitrogen losses and improve GHG balance? Results from a 19-yr experiment in Northern France. *Geoderma* 342, 20-33.

Liste des publications ayant utilisé l'essai (5/5)

Sur l'effet des systèmes sur les mycotoxines

Champeil A., Fourbet J.F., Doré T., Rossignol L., 2004. Influence of cropping system on Fusarium head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection*, 23(6), 531-537

Pour la validation d'un modèle de dynamique des adventices

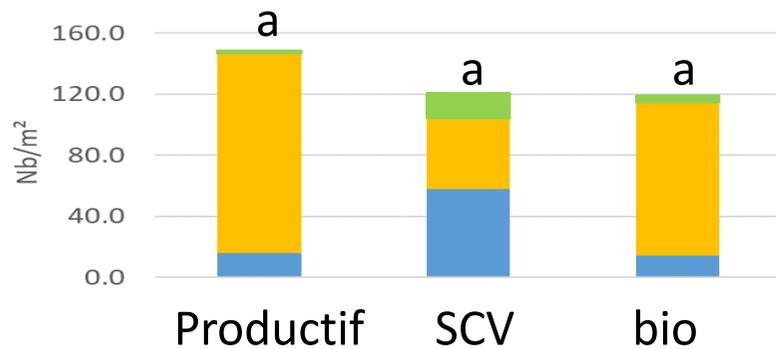
Colbach N., Bertrand M., Busset H., Colas F., Dugué F. Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N., Noilhan C., Strbik F., Gardarin A., 2016. Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software* (2016) 184-203

Plus des études ayant utilisé l'essai comme source d'échantillons de sol contrastés mais à partir d'un même substrat pédologique

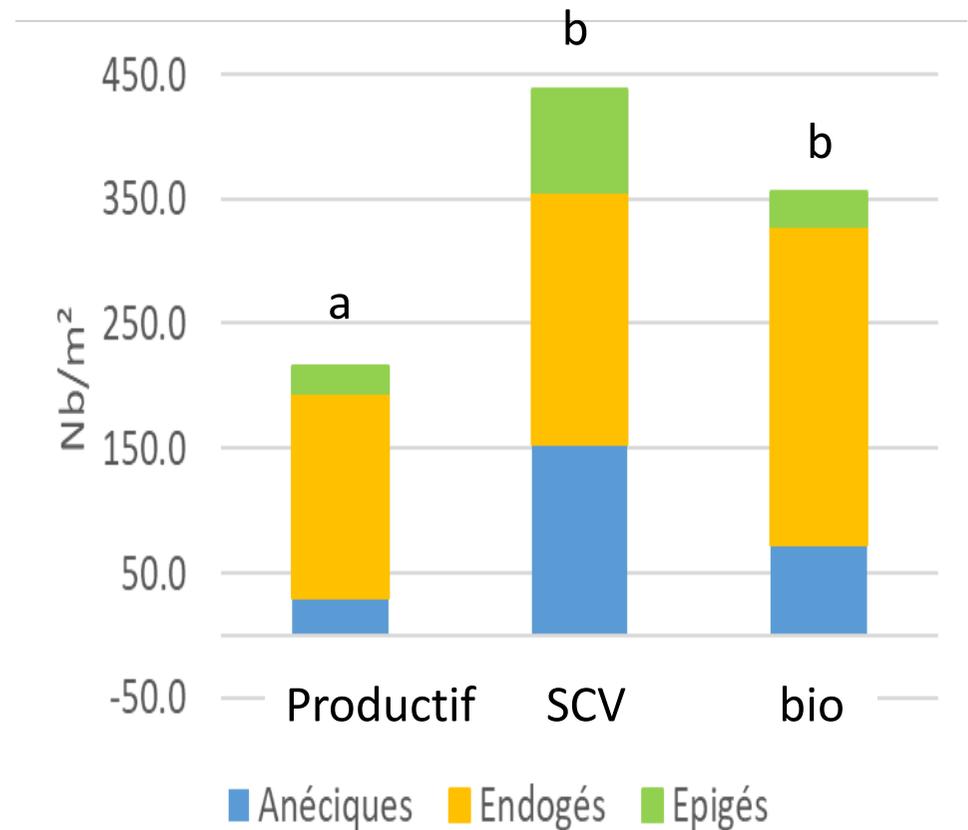
Suivi des communautés de vers de terre

(d'après Pelosi et al, 2009, 2015)

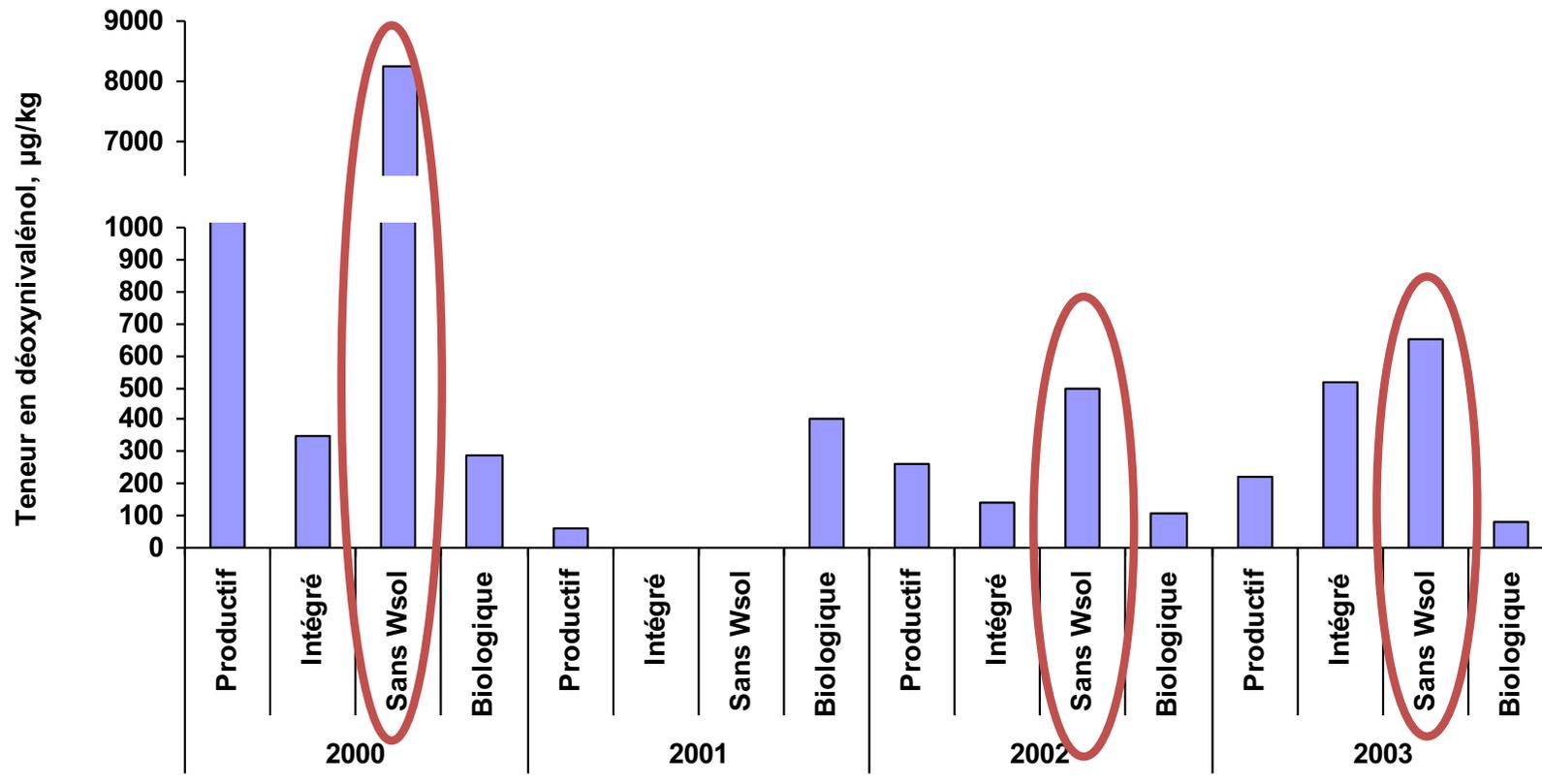
Abondance 2005-2007



Abondance 2011-2013



Suivi de la contamination des récoltes de blé par des mycotoxines (d'après Champeil *et al*, 2004)



Déoxynivaléno

SCV > tous les autres systèmes de culture

Nivaléno

SCV ≥ Bio et BNI ≥ Productif

Perspectives:

Un essai qui a acquis une valeur patrimoniale avec des états du milieu singuliers, créés par des systèmes de culture, dans un même contexte pédoclimatique.

La nécessité d'une remise à plat des systèmes, pour rechercher la rupture (le BNI n'est plus en rupture), afin de continuer à produire des connaissances et des références sur des systèmes qui n'existent pas chez les agriculteurs

Mieux organiser la complémentarité avec les études de systèmes innovants d'agriculteurs

UMR Agronomie
Unité Expérimentale Grandes Cultures Versailles-Grignon

Merci de votre attention !