

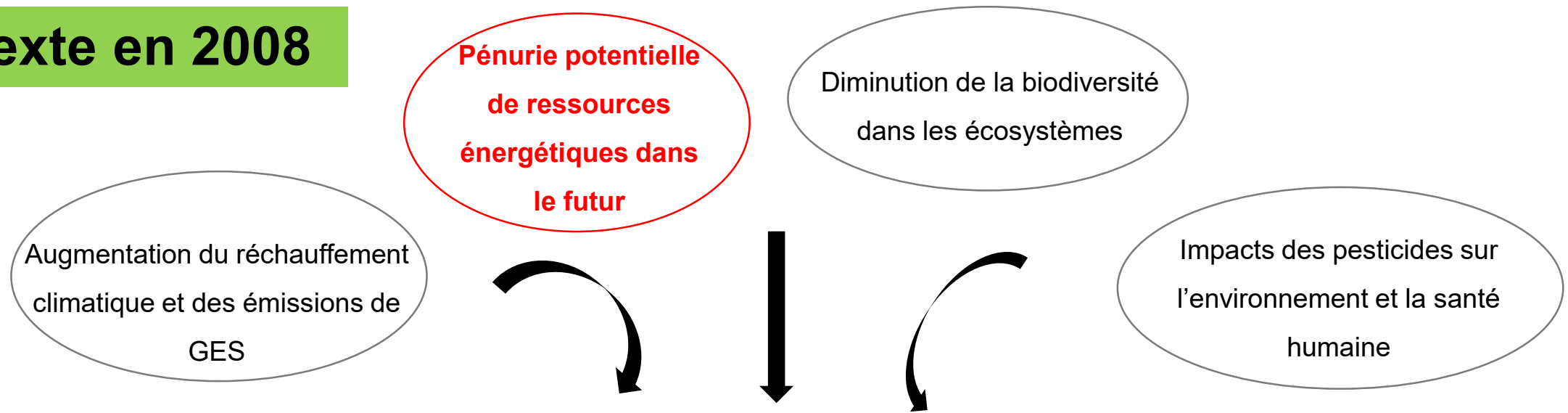


Conception et évaluation de systèmes de culture innovants 11 années d'expérimentation dans le dispositif S.I.C. Résultats de performances énergétiques

C. Colnenne-David, M.H. Jeuffroy, G. Grandeau, T. Doré



Contexte en 2008



La Recherche doit proposer, tester, analyser de nouveaux systèmes de culture qui satisfont une multiplicité de critères environnementaux tout en étant productifs

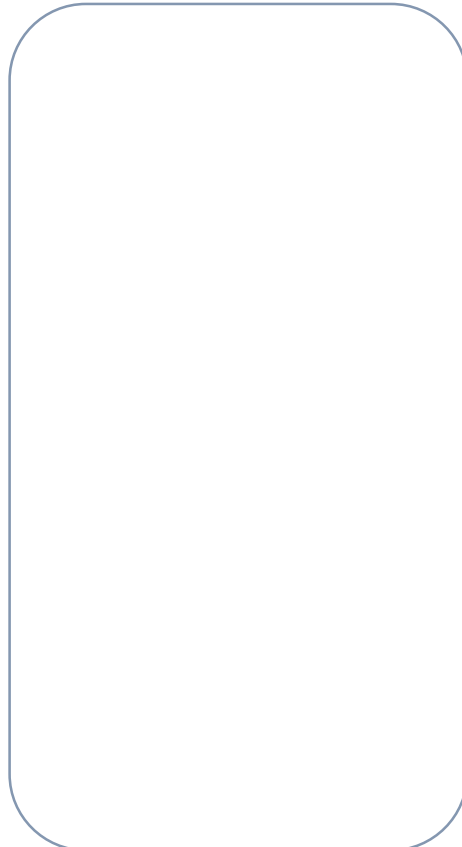
Objectifs

- 1. Concevoir des systèmes de culture innovants par prototypage participatif** (*Vereijken et al., 1997; Lançon et al., 2007*)
- 2. Evaluer les systèmes prototypes les plus prometteurs dans un essai de longue durée** (*Reau et al., 1996; Debaeke et al., 2009*)

Contraintes et objectifs assignés aux systèmes de culture innovants

PHPE

Productif à hautes performances environnementales



No-Pest

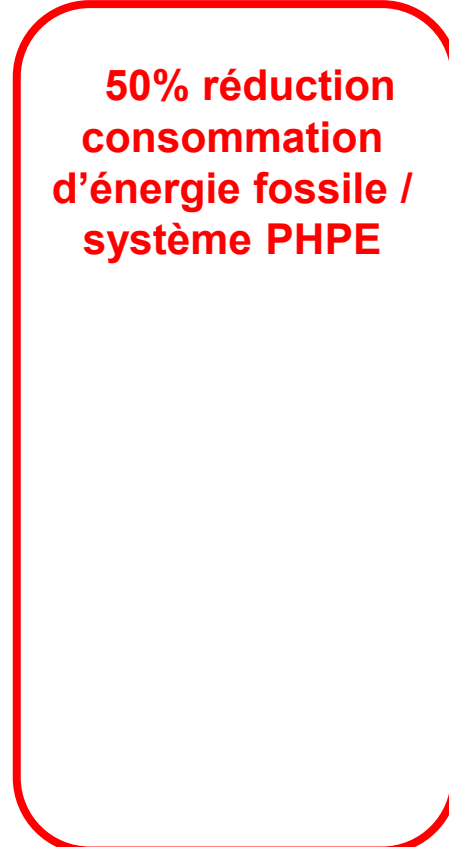
Sans pesticide

Sans pesticide de synthèse ni produit autorisé en AB



**EN-
Energie moins**

50% réduction consommation d'énergie fossile / système PHPE



GES-

Gaz à effet de serre moins

50% réduction émissions de GES / système PHPE



Contraintes et objectifs assignés aux systèmes de culture innovants

PHPE

Productif à hautes performances environnementales

Un set de critères environnementaux

No-Pest

Sans pesticide

Sans pesticide de synthèse ni produit autorisé en AB

Un set de critères environnementaux

EN-
Energie moins

50% réduction consommation d'énergie fossile / système PHPE

Un set de critères environnementaux

GES-

Gaz à effet de serre moins

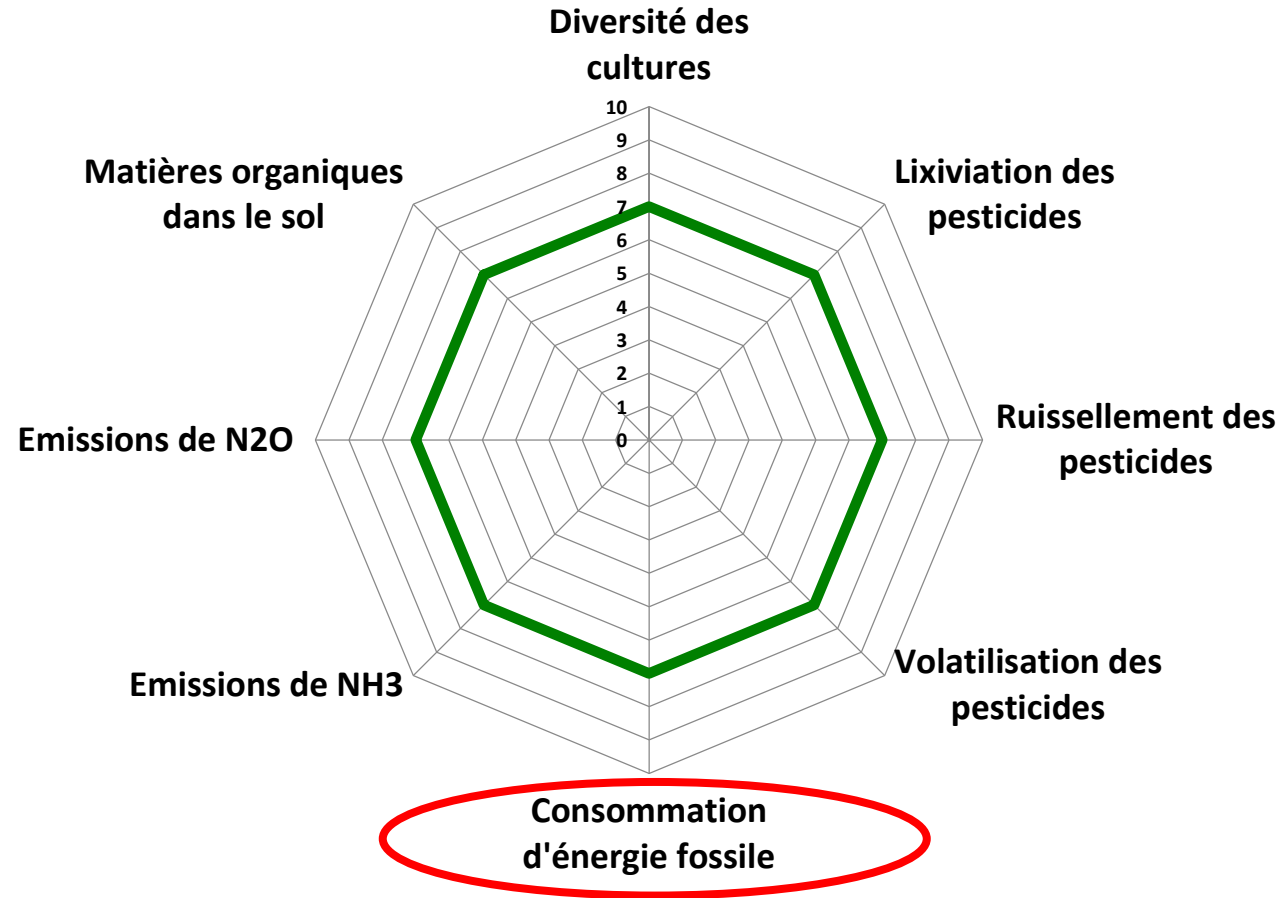
50% réduction émissions de GES / système PHPE

Un set de critères environnementaux

Les indicateurs agri-environnementaux

**Indicateurs
agri-environnementaux
calculés avec l'outil
Indigo®**
(Bockstaller *et al.* 2008)

**Valeurs minimales ($v \geq 7$)
pour satisfaire les critères
environnementaux**



Contraintes et objectifs assignés aux systèmes de culture innovants

PHPE

Productif à hautes performances environnementales

No-Pest

Sans pesticide

**EN-
Energie moins**

GES-

Gaz à effet de serre moins

Sans pesticide de synthèse ni produit autorisé en AB

50% réduction consommation d'énergie fossile / système PHPE

50% réduction émissions de GES / système PHPE

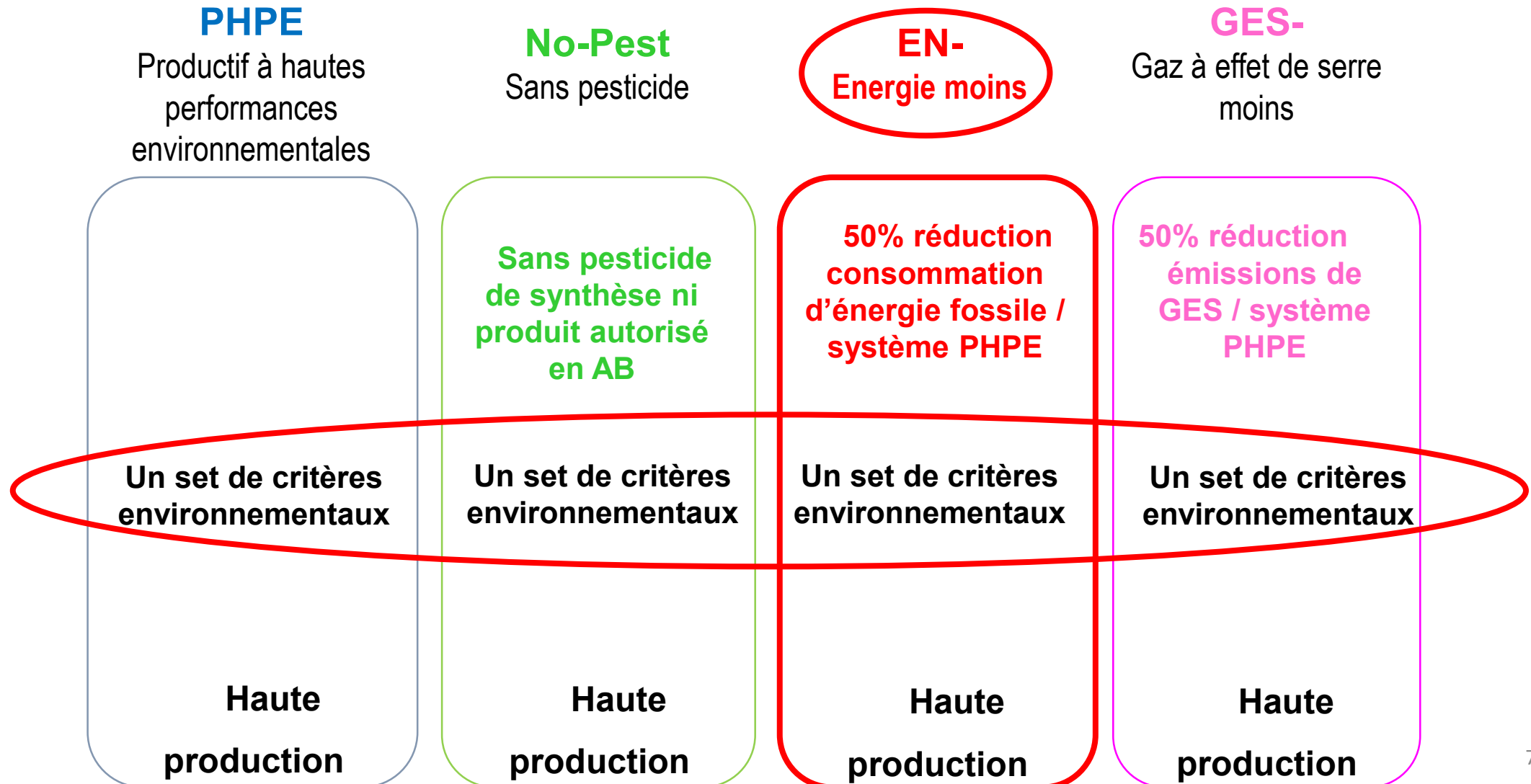
Un set de critères environnementaux

Un set de critères environnementaux

Un set de critères environnementaux

Un set de critères environnementaux

Contraintes et objectifs assignés aux systèmes de culture innovants



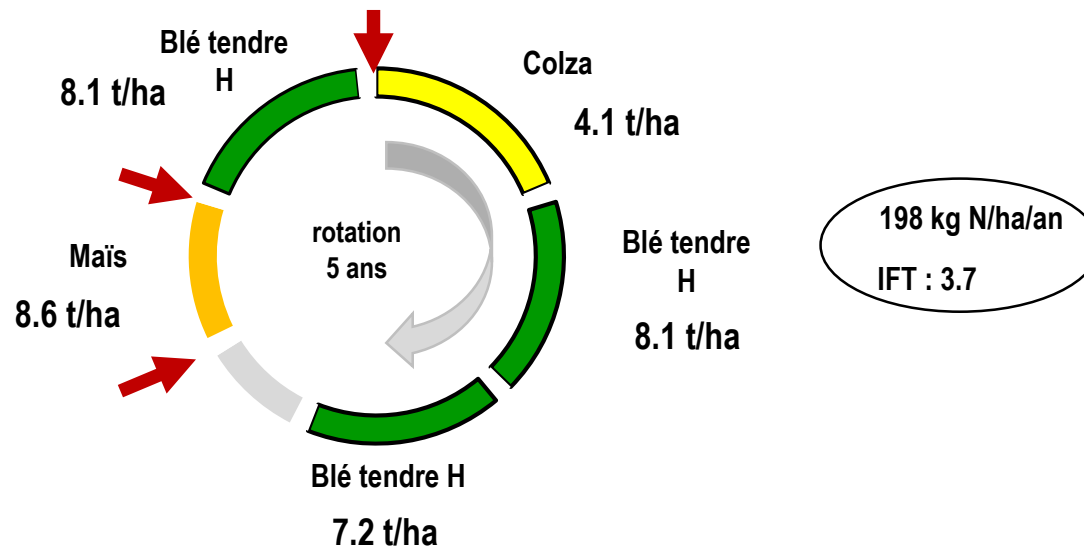
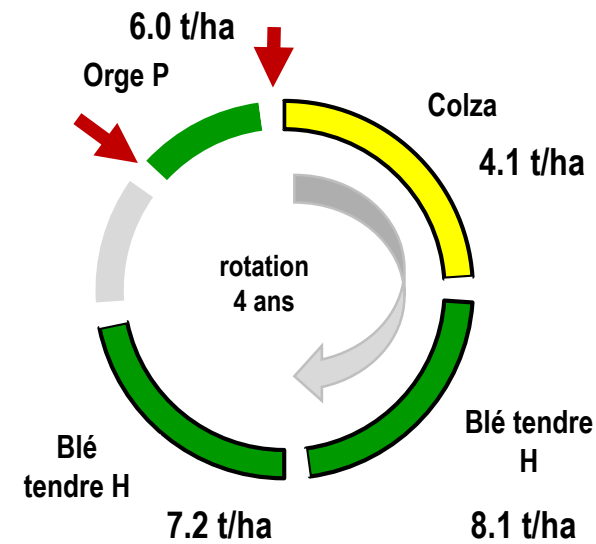
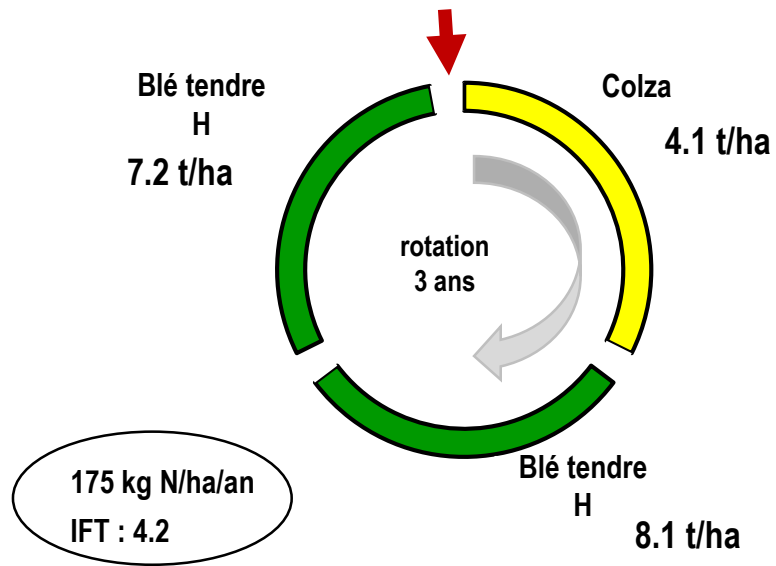
Dispositif expérimental

- ✓ Ferme AgroParisTech Grignon (78)
- ✓ 6.2 ha
- ✓ Sol : limon profond homogène
- ✓ 3 répétitions
- ✓ 4 systèmes de culture (sdci)
- ✓ Surface parcelle # 4000m²
- ✓ Durée : 11 ans (2009-2019)
- ✓ 2 cycles de rotation :
 - complets pour sdc PHPE et EN-,
 - incomplets pour 0Pest et GES- (sans 2020)



Systemes de culture représentatifs de la zone de production

Plaine de Versailles (2012-2015) (L. Lefèvre, 2015)



Durée des rotations variables
 Nombreuses céréales à paille d'hiver
 Labours réguliers ↓
 Fertilisation azotée (>170kgN/ha/an)
 Protection phytosanitaire systématique
 Rendement (t/ha ; 0%)

Consommations d'énergie fossile

Opérations culturales, intrants : coûts en énergie fossile directe et indirecte (GESTIM, 2019)

Opérations culturales	Consommation d'énergie (MJ/ha)	
	Directe	Indirecte
Labour (charrue 5 socs, tracteur 150 cv : 200 ha/h)	1260	91
Gros cultivateur (tracteur 130 cv : 200 ha/h)	1047	73
Herse rotative (tracteur 130 cv : 80/150 ha/h)	672	90
Combiné de semis (tracteur 130 cv : 120 ha/h)	827	109
Semoir direct (tracteur 90 cv : 120 ha/h)	279	125
Passage épandeur (tracteur 90 cv : 100 ha/h)	126	14
Bineuse (tracteur 90cv : 80 ha/h)	226	46
Herse étrille	61	30
Pulvérisateur (pesticides) (tracteur 90 cv)	65	17
Moissonneuse batteuse (260 cv)	1512	173

Prise en compte de la puissance du tracteur spécifique à chacun des matériels, et des superficies traitées spécifiques à chacune des opérations culturales

Intrants	Consommation d'énergie indirecte
Ammonitrate (33.5%)	15.9 MJ/kg
Urée 46%	28.9 MJ/kg
Super 45 (P)	4.4 MJ/kg
Chlorure de K (40%)	3.0 MJ/ha
H : Roundup max 480 (DH 3 à 4 l/ha)	141.6 MJ/l
H : Bofix (DH 3 l/ha)	76.7 MJ/l
H : Colzor trio (DH colza 4l/ha)	119.5 MJ/l
M : mesuroi pro (DH 3kg/ha)	5.6 MJ/ kg
M : metarex (ino DH 5 kg/ha)	11.5 MJ/ kg
F : amistar (DH BTH 1l/ha)	102.0 MJ/ l
F : caramba star (DH BTH 1l/ha)	18.4 MJ/ l
Semences : céréales (avoine, blé, trit.)	3 à 4 MJ/kg
Semences : colza (lin)	8.5 MJ/kg
Semences : pois	2.6 MJ/kg
Séchage de grains	3.45 GJ/t H ₂ O ¹⁰

Consommations d'énergie fossile

Opérations culturales, intrants : coûts en énergie fossile directe et indirecte (GESTIM, 2019)

Opérations culturales	Consommation d'énergie (MJ/ha)	
	Directe	Indirecte
Labour (charrue 5 socs, tracteur 150 cv : 200 ha/h)	1260	91
Gros cultivateur (tracteur 130 cv : 200 ha/h)	1047	73
Herse rotative (tracteur 130 cv : 80/150 ha/h)	672	90
Combiné de semis (tracteur 130 cv : 120 ha/h)	827	109
Semoir direct (tracteur 90 cv : 120 ha/h)	279	125
Passage épandeur (tracteur 90 cv : 100 ha/h)	126	14
Bineuse (tracteur 90cv : 80 ha/h)	226	46
Herse étrille	61	30
Pulvérisateur (pesticides) (tracteur 90 cv)	65	17
Moissonneuse batteuse (260 cv)	1512	173

Prise en compte de la puissance du tracteur spécifique à chacun des matériels, et des superficies traitées spécifiques à chacune des opérations culturales

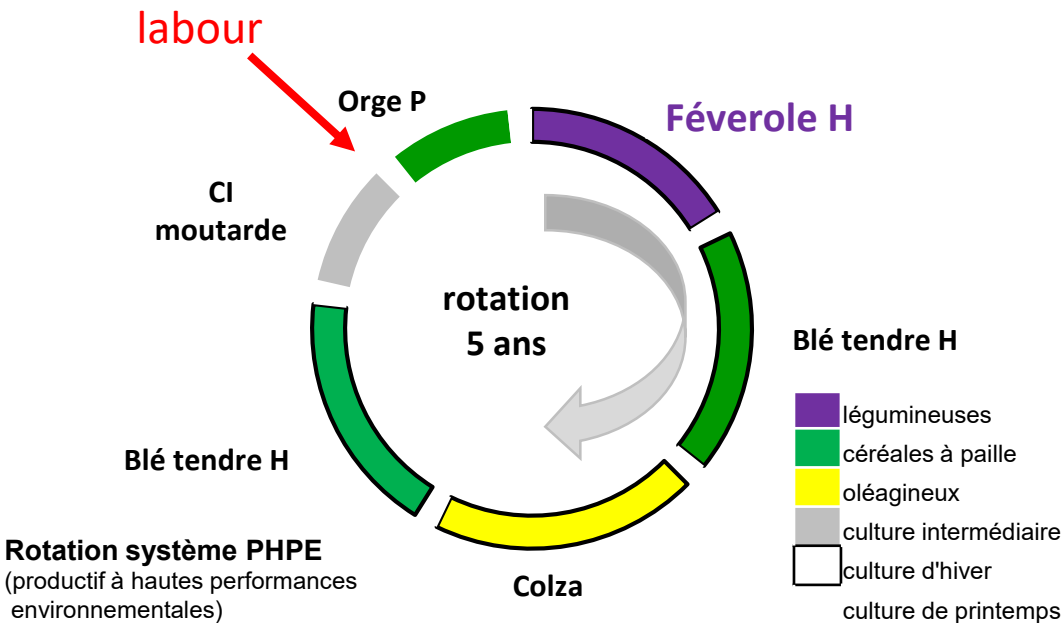
Intrants	Consommation d'énergie indirecte
Ammonitrate (33.5%)	15.9 MJ/kg
Urée 46%	28.9 MJ/kg
Super 45 (P)	4.4 MJ/kg
Chlorure de K (40%)	3.0 MJ/ha
H : Roundup max 480 (DH 3 à 4 l/ha)	141.6 MJ/l
H : Bofix (DH 3 l/ha)	76.7 MJ/l
H : Colzor trio (DH colza 4l/ha)	119.5 MJ/l
M : mesuroi pro (DH 3kg/ha)	5.6 MJ/ kg
M : metarex (ino DH 5 kg/ha)	11.5 MJ/ kg
F : amistar (DH BTH 1l/ha)	102.0 MJ/ l
F : caramba star (DH BTH 1l/ha)	18.4 MJ/ l
Semences : céréales (avoine, blé, trit.)	3 à 4 MJ/kg
Semences : colza (lin)	8.5 MJ/kg
Semences : pois	2.6 MJ/kg
Séchage de grains	3.45 GJ/t H₂O

Objectifs et leviers techniques : 2009 - 2019

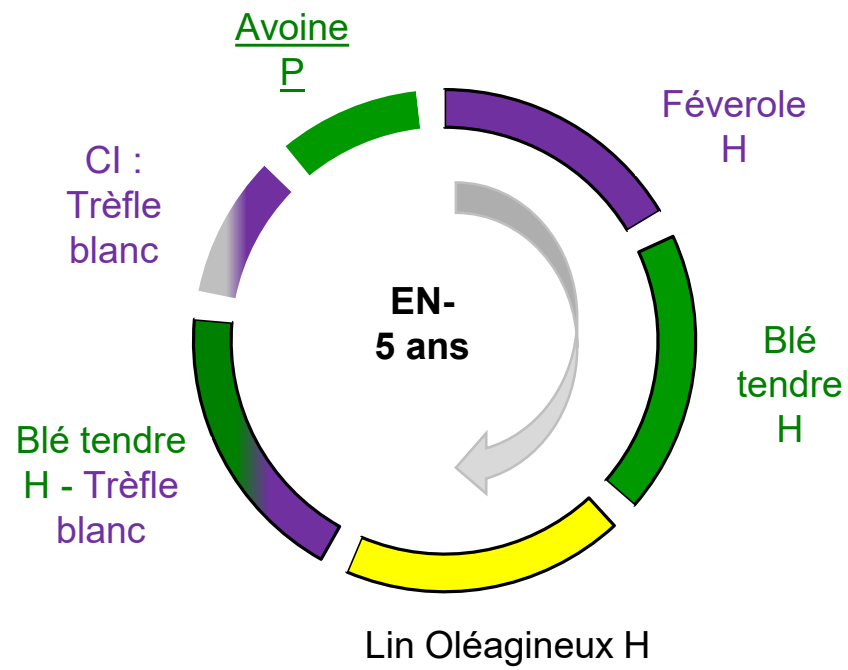
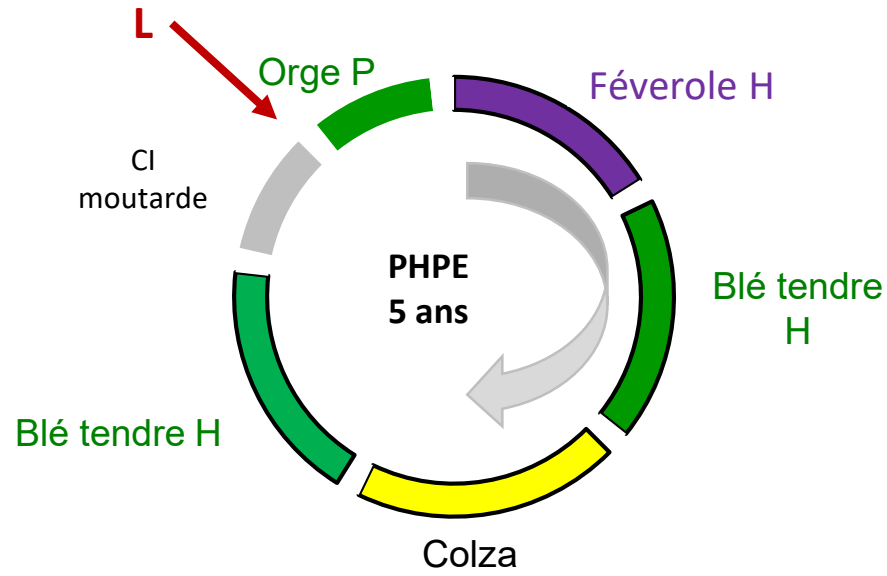
combinés à l'échelle de la succession culturale et de chaque culture

Satisfaire les critères environnementaux

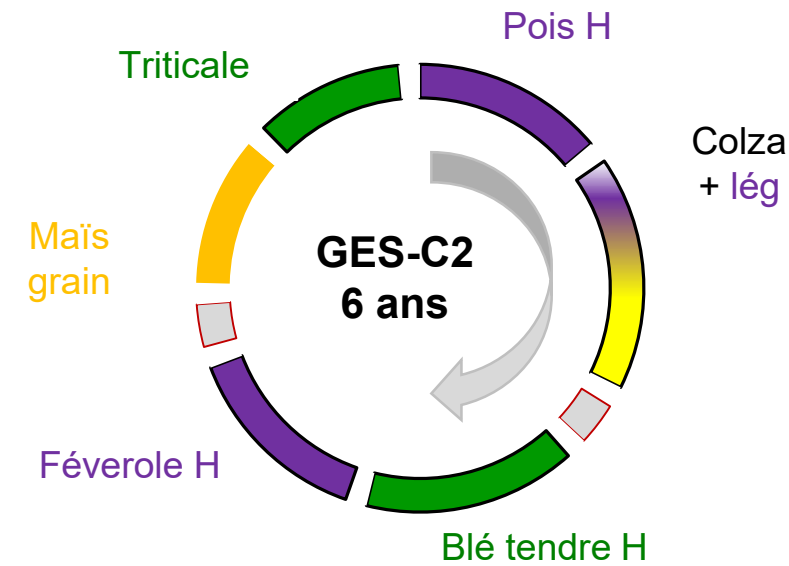
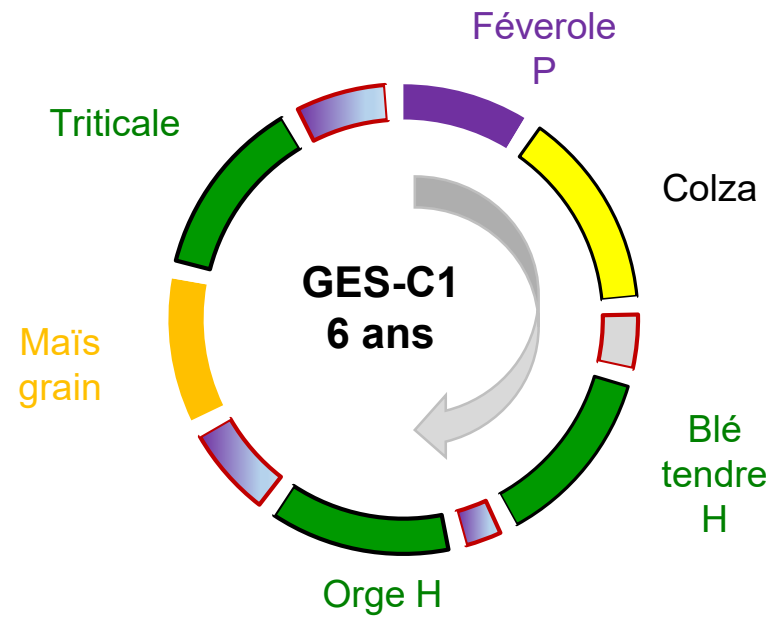
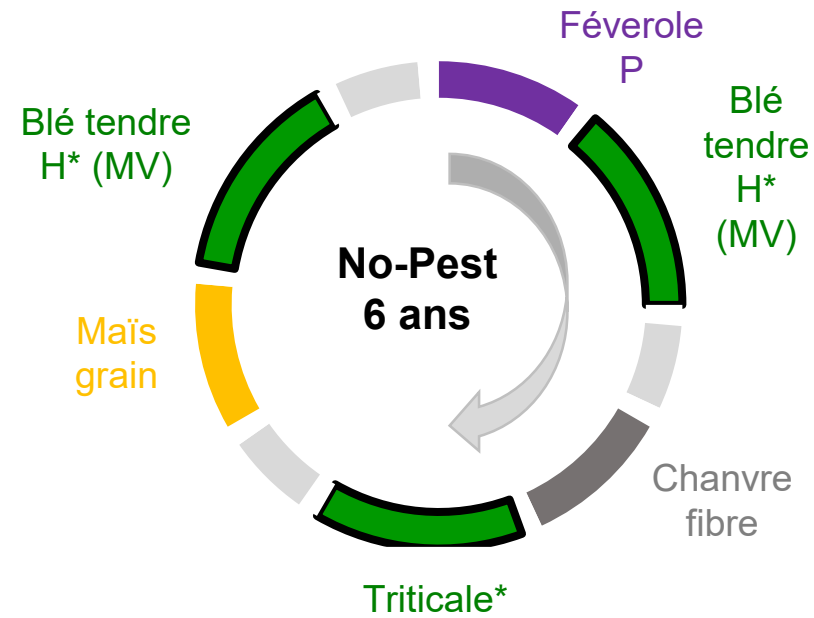
- ✓ Limiter les pollutions d'origine pesticides : augmenter la diversité des espèces implantées, choisir des variétés résistantes et des dates et densités de semis spécifiques
- ✓ Accroître la diversité des espèces cultivées : nombre élevé d'espèces implantées, allongement de la durée de la rotation
- ✓ **limiter la consommation d'énergie fossile : un seul labour / cycle de rotation – ajouter des légumineuses**
- ✓ Limiter les pertes azotées : implanter des cultures intermédiaires (CI) , planification spécifique de la fertilisation azotée
- ✓ Maintenir la fertilité des sols : restitution de toutes les pailles

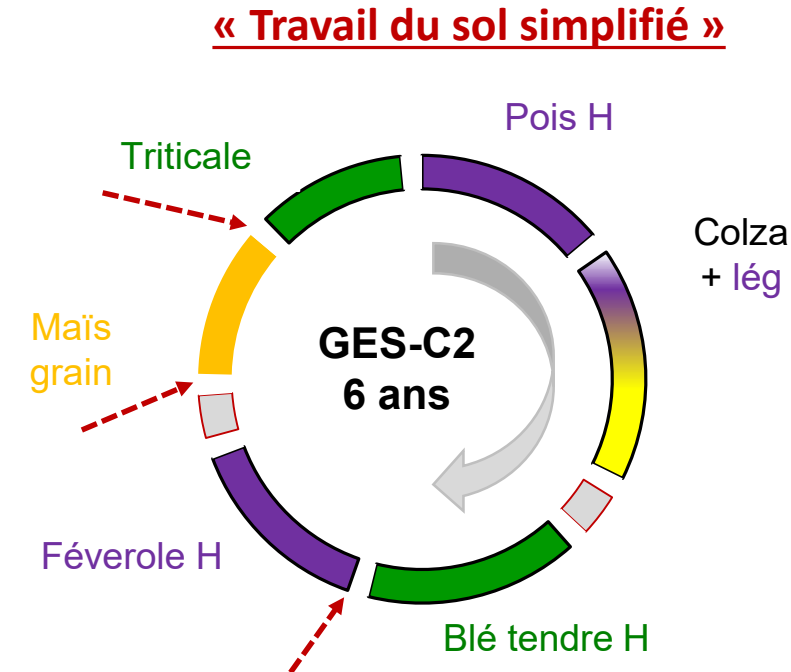
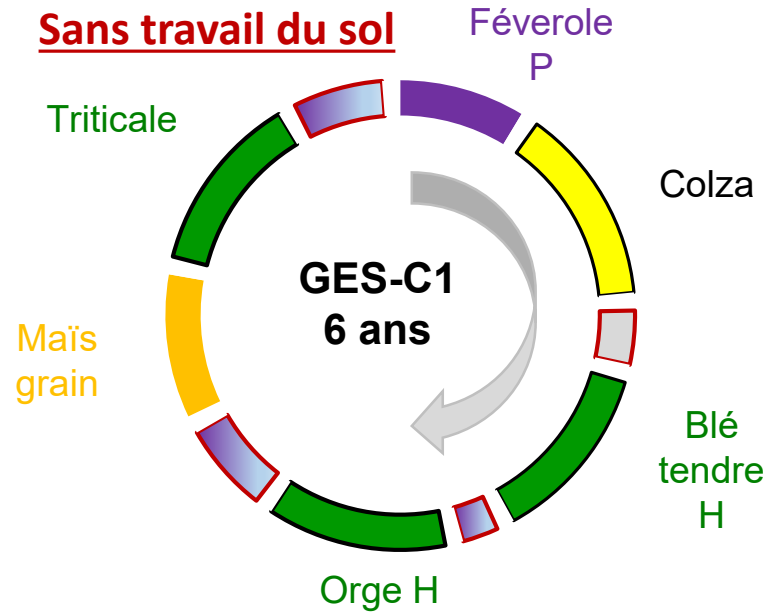
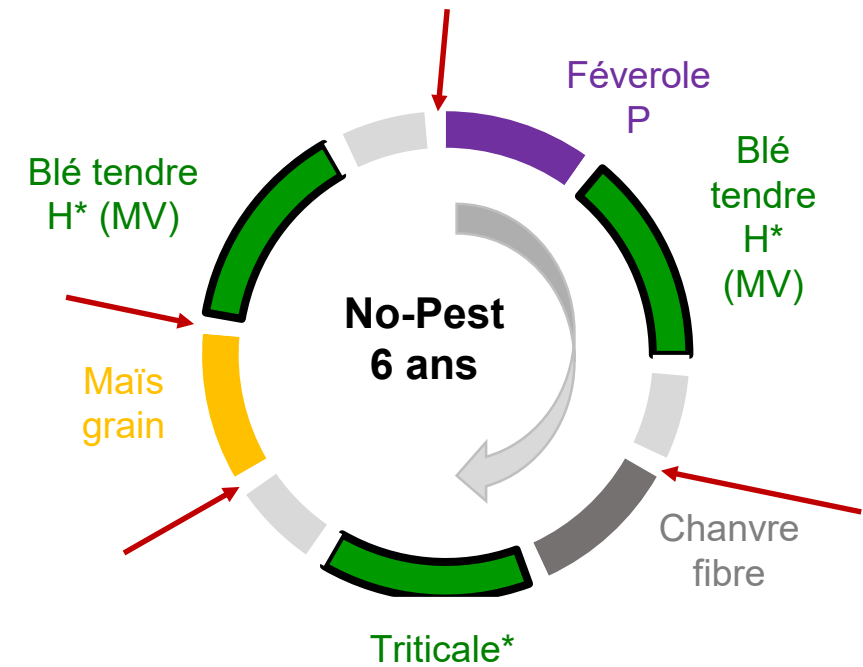
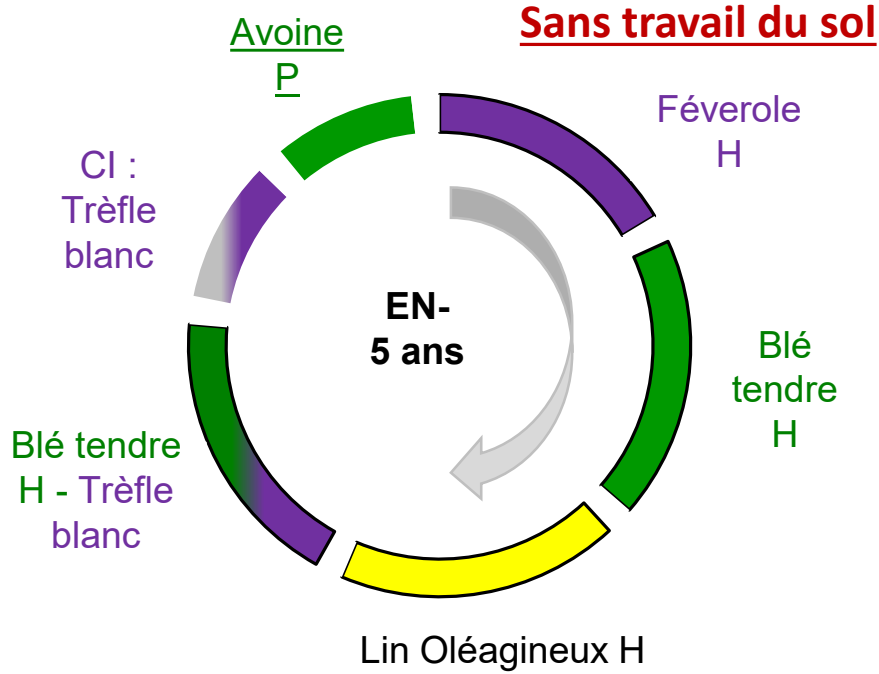
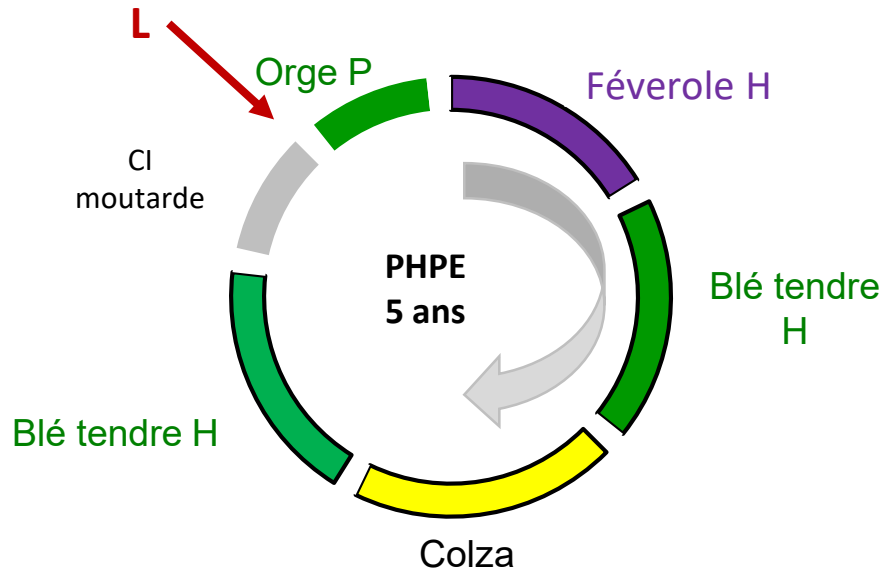


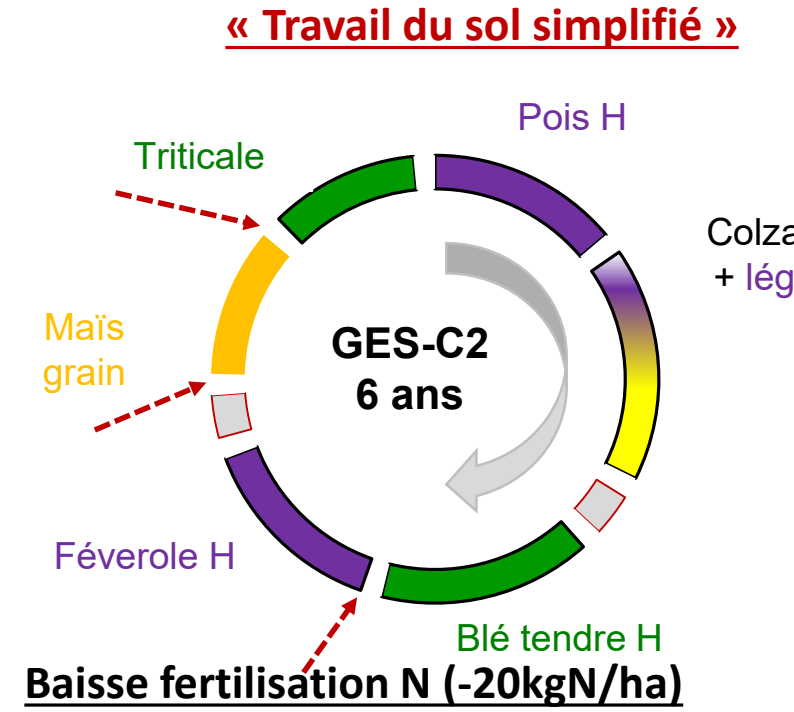
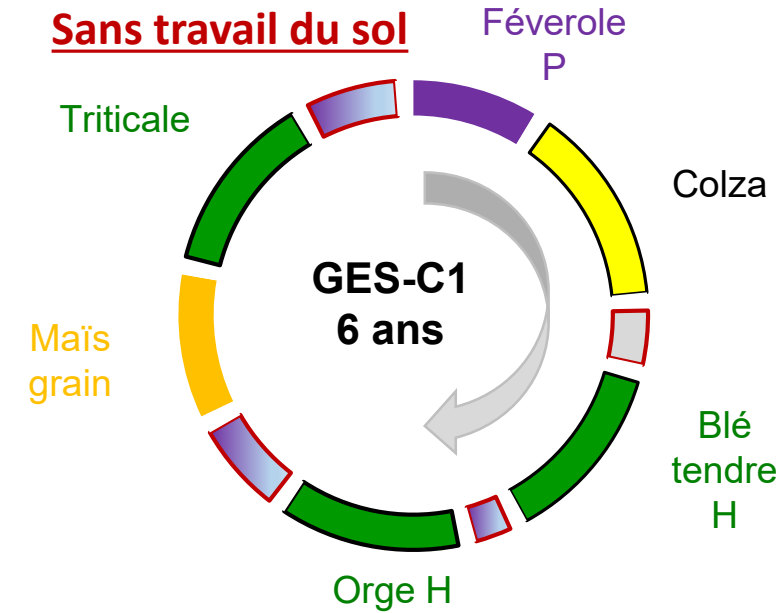
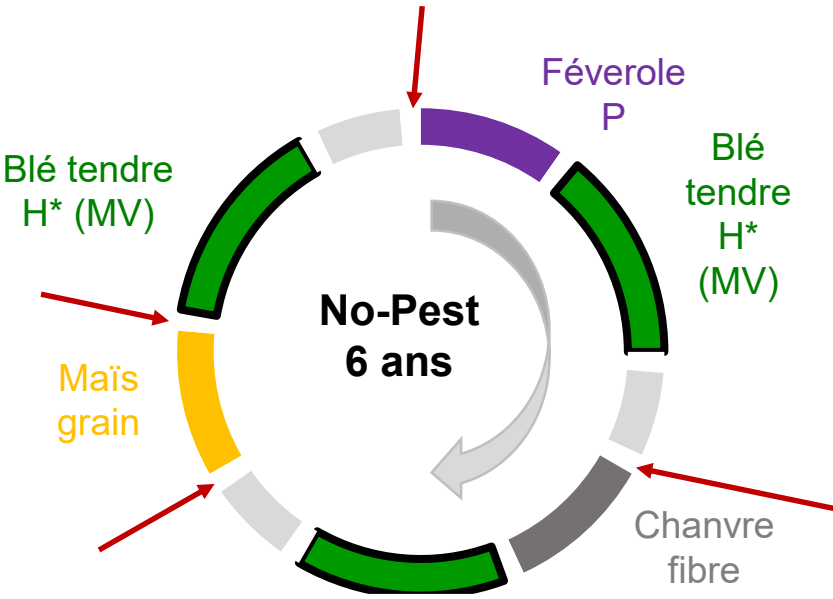
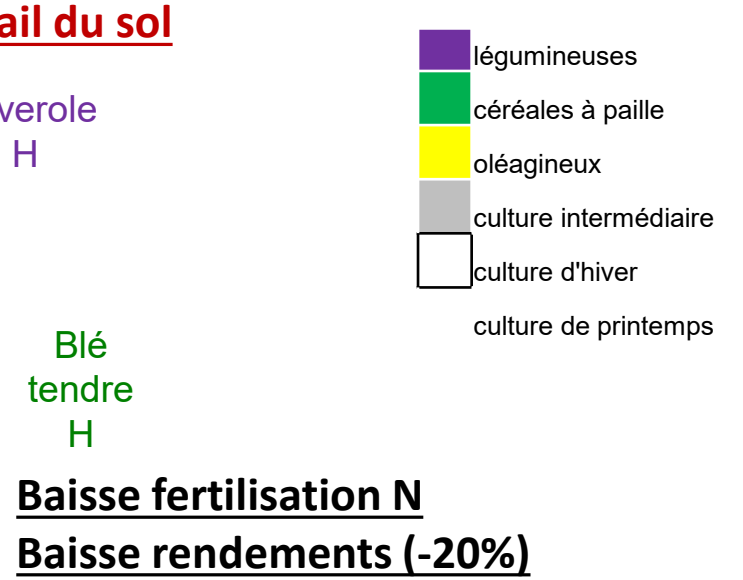
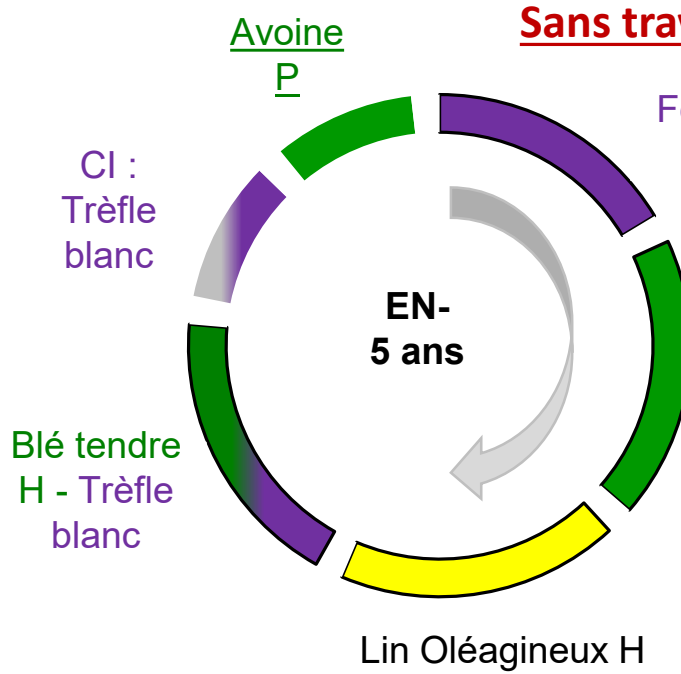
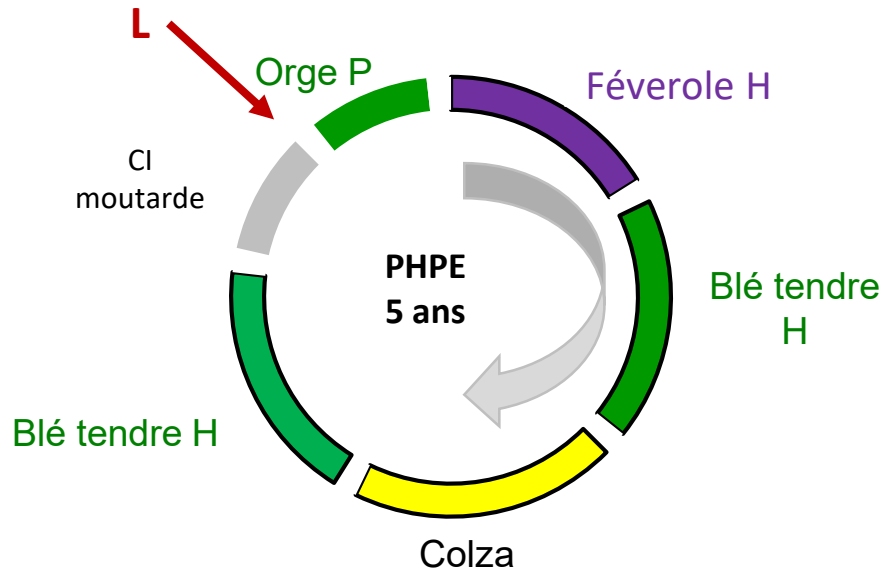
	PHPE	Plaine de Versailles
Nombres d'espèces	6	2 à 4
Durée rotation	5 ans	3 à 5 ans
Nombre de labours	1/5 ans	1/3 ans à 2/3 ans
Implantation légumineuse	1/ 5 ans	Aucune
Culture intermédiaire	Oui	Non
Restitution des pailles	Oui	Oui



- légumineuses
- céréales à paille
- oléagineux
- culture intermédiaire
- culture d'hiver
- culture de printemps







Sans pesticides
Baisse rendements

Rendements # PHPE

Baisse fertilisation N (-20kgN/ha)

Méthodes de calcul

Consommations d'énergie fossile (GESTIM, 2019)

- Energie directe : carburants, lubrifiants et électricité utilisés pour alimenter les machines agricoles et les tracteurs
- Energie indirecte : fabrication, formulation, emballage et entretien des intrants (engins agricoles, engrais ou pesticides)

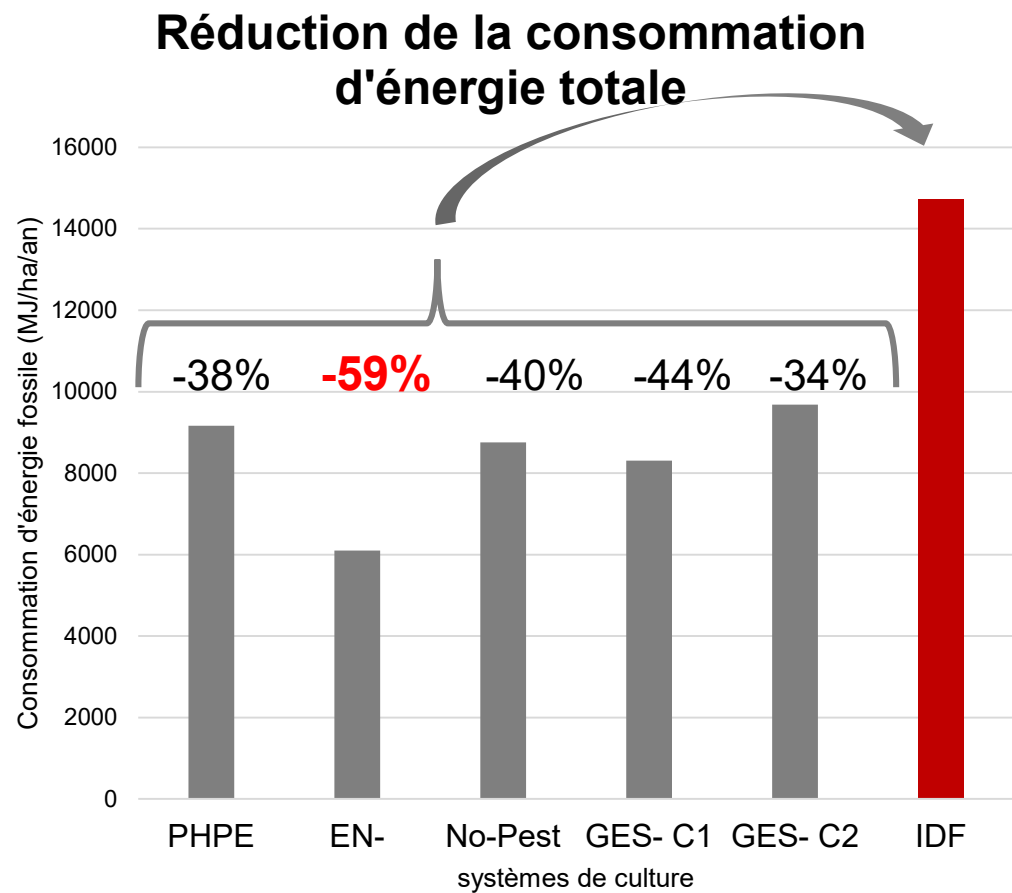
Production d'énergie (GESTIM, 2019)

- Production énergétique brute des produits récoltés

Consommations et productions : MJ / ha / an, moyennées sur 11 ans (sauf GES)

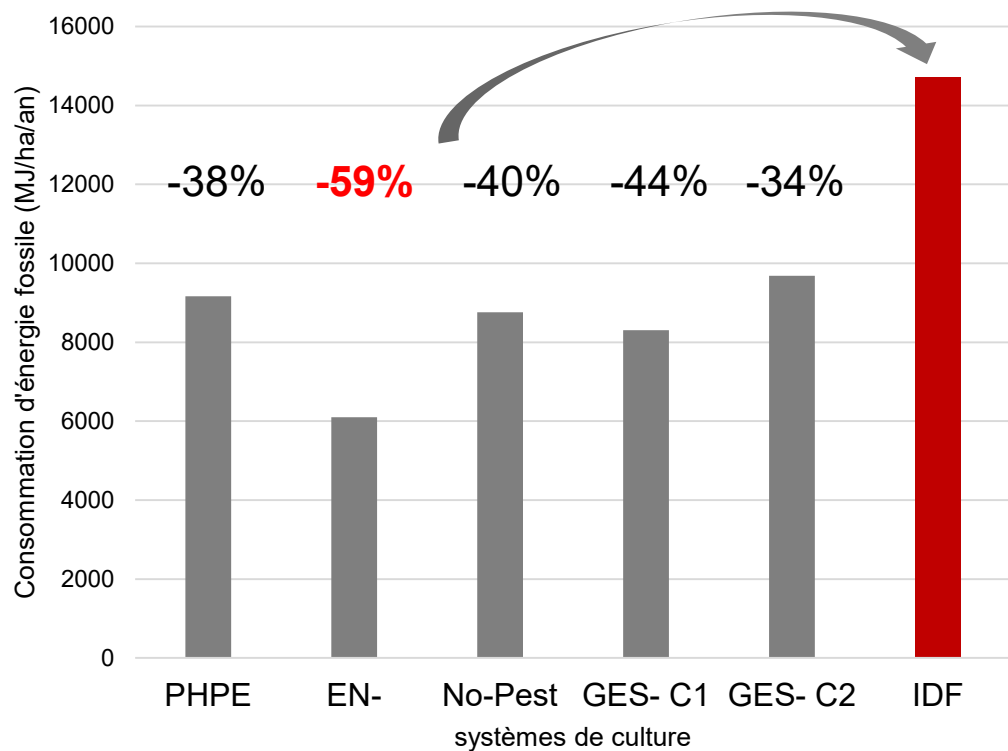
Efficiency énergétique : ratio annuel (production / consommation), moyennés sur 11 ans (sauf GES)

→ **Consommations d'énergie totale des sdc innovants très inférieures à celles des sdc locaux**

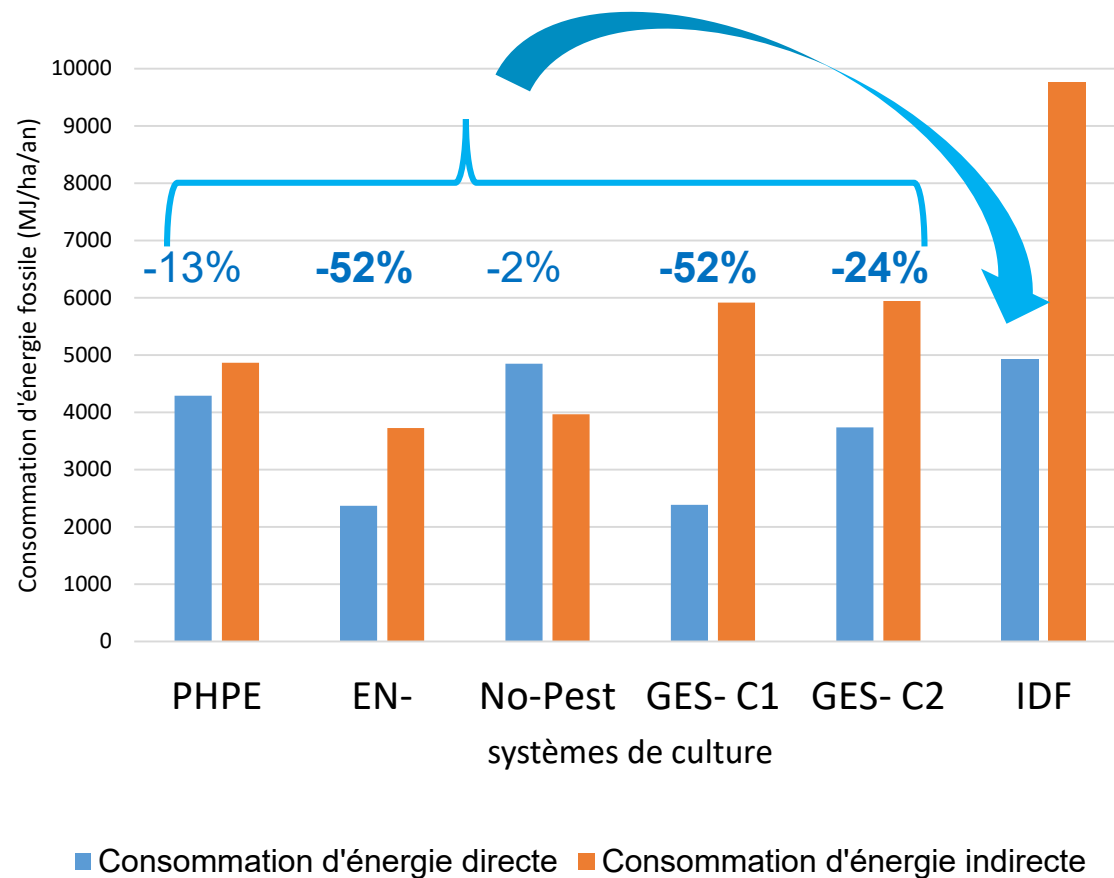


→ Consommations d'énergie directe des sdc innovants sans travail du sol très inférieures à celles des sdc locaux

Réduction de la consommation d'énergie totale

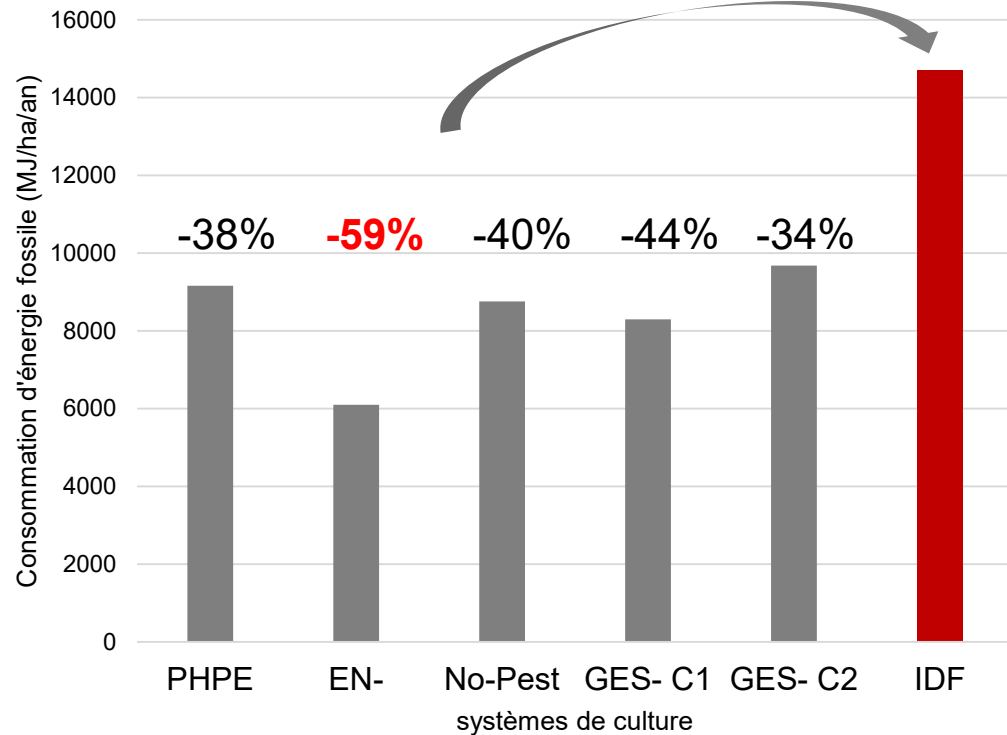


Réduction de la consommation d'énergie directe

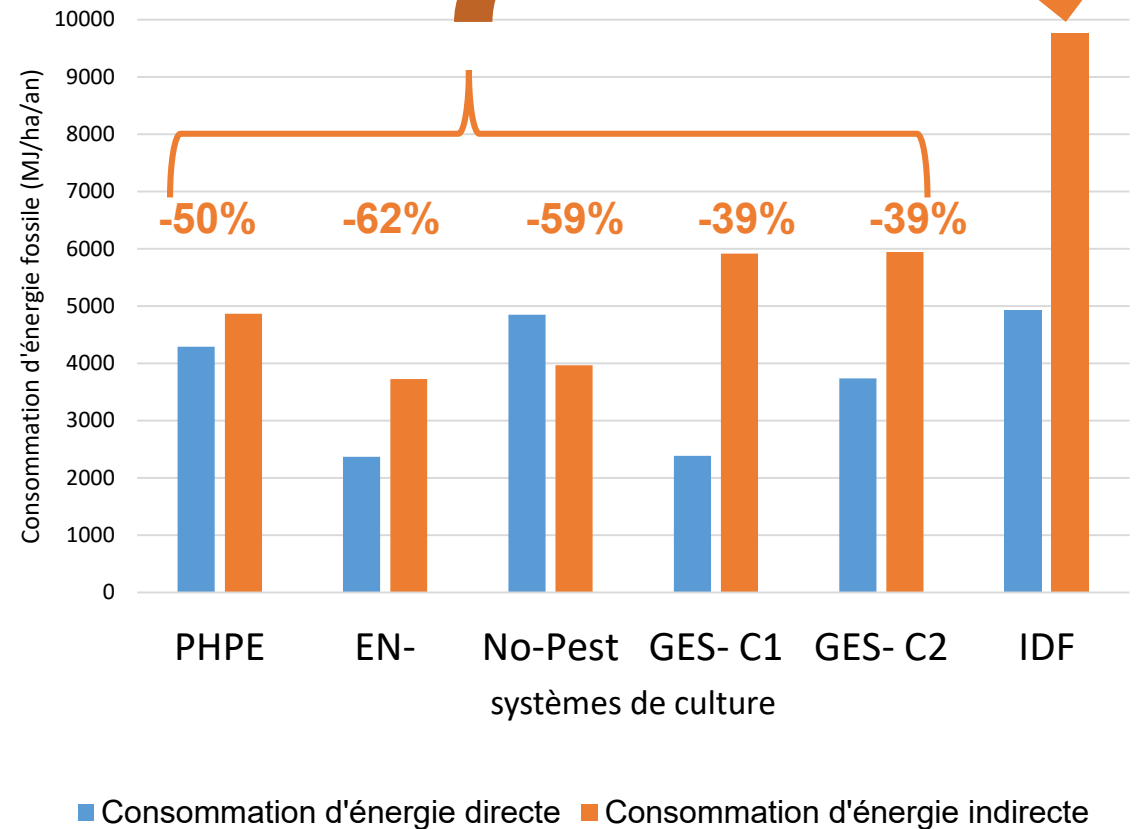


→ **Consommations d'énergie indirecte des sdc innovants beaucoup plus faibles que celles des sdc locaux**

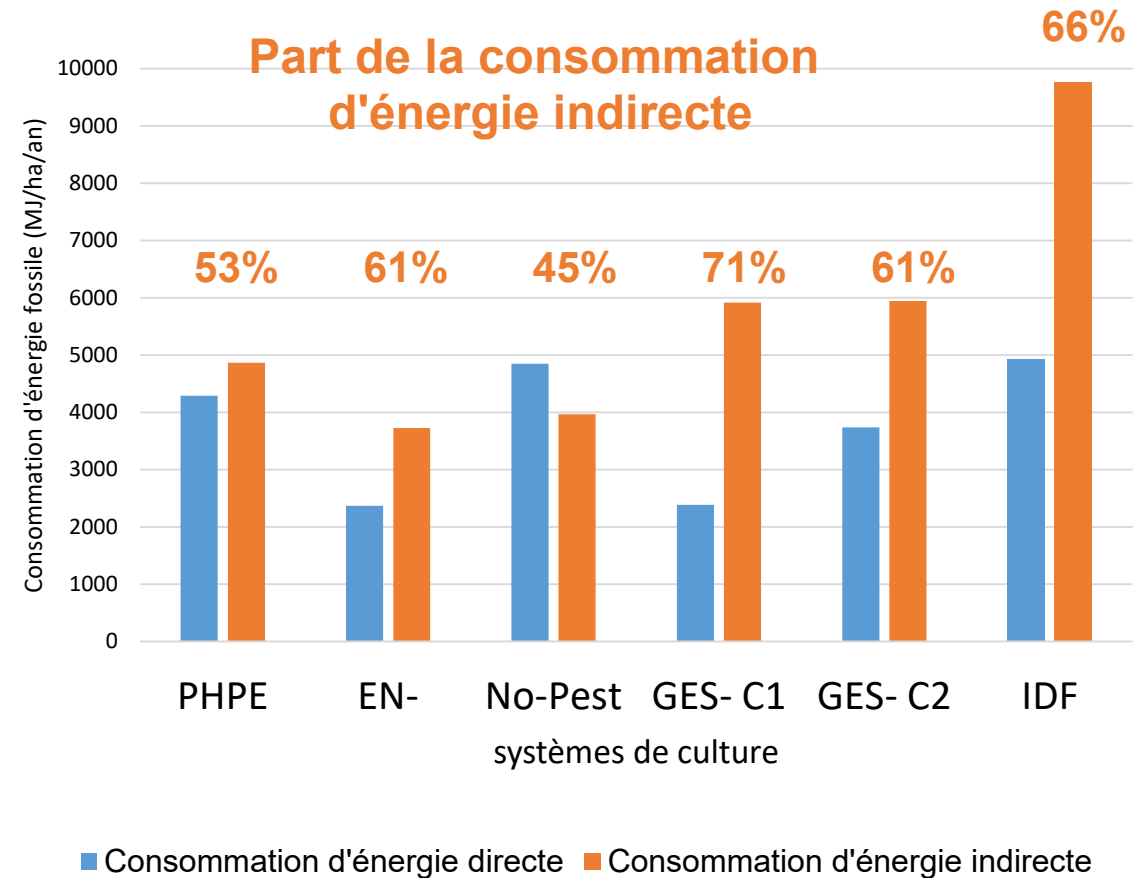
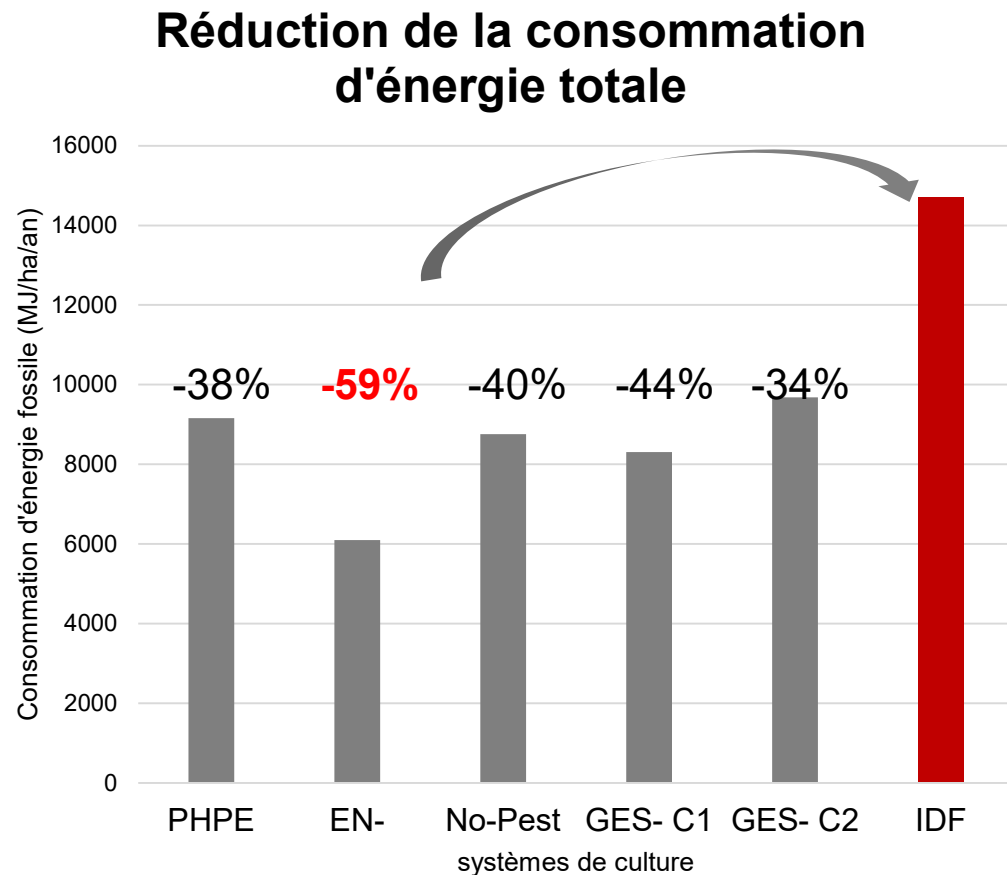
Réduction de la consommation d'énergie totale



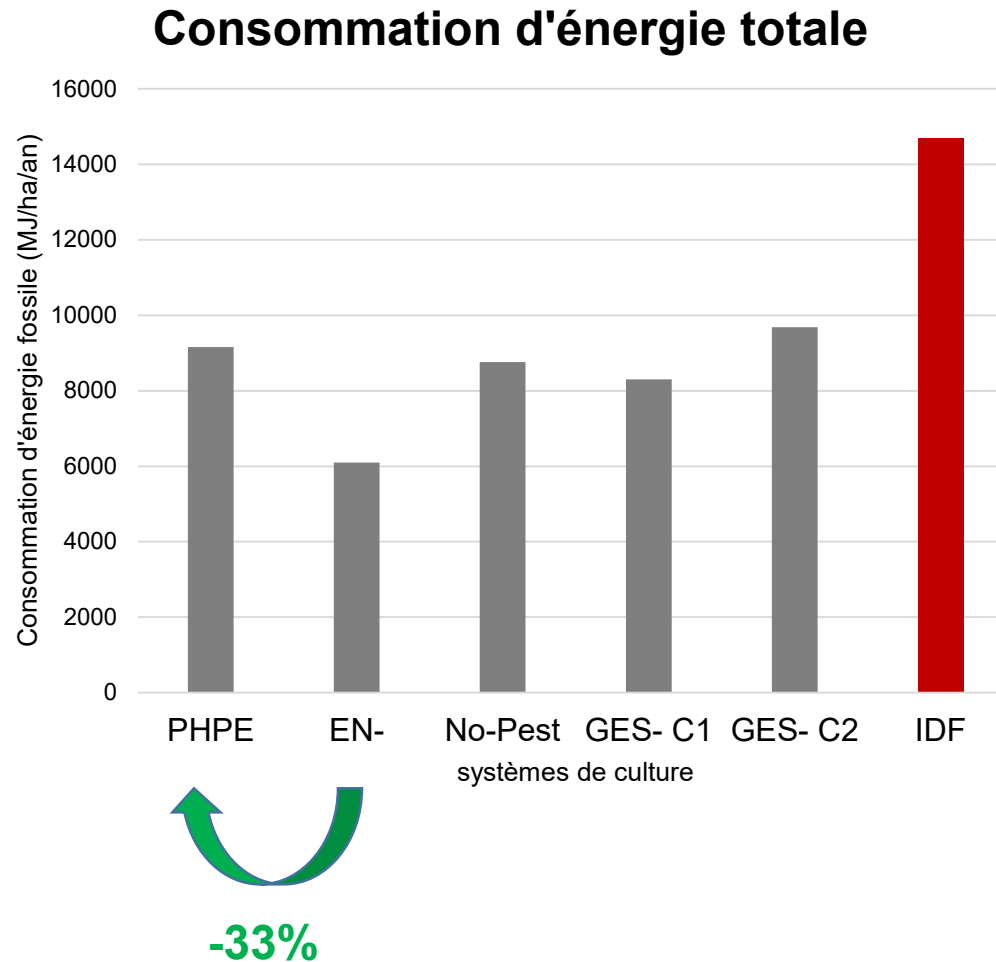
Réduction de la consommation d'énergie indirecte



→ **Part majoritaire de la consommation d'énergie indirecte**, excepté dans sdci No-Pest
(consommation d'énergie directe proche entre PHPE et No-Pest)

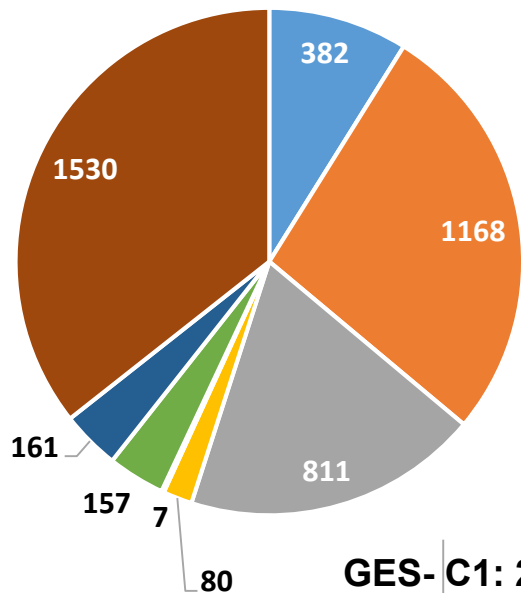


→ Consommation d'énergie totale du sdci EN- très inférieure à celle du sdci PHPE

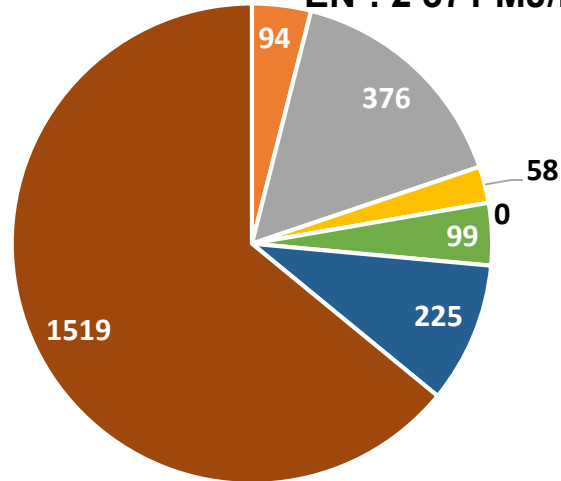


Répartition de la consommation d'énergie directe entre postes

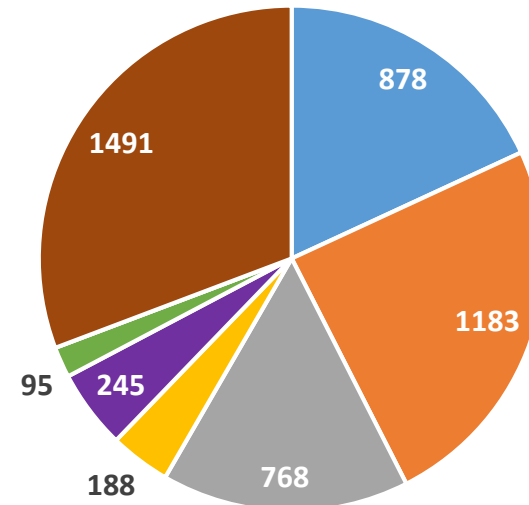
PHPE: 4 294 MJ/ha/an



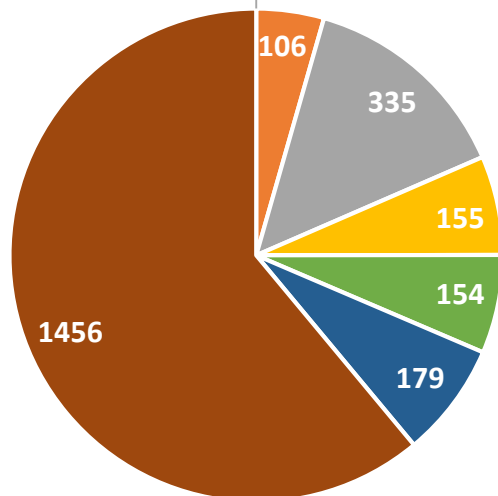
EN-: 2 371 MJ/ha/an



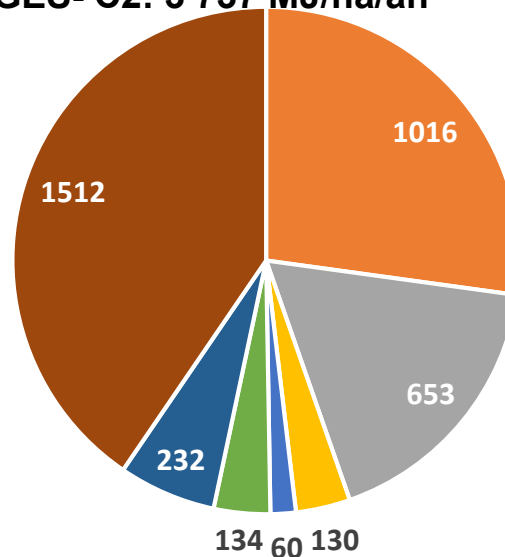
No-Pest: 4 849 MJ/ha/an



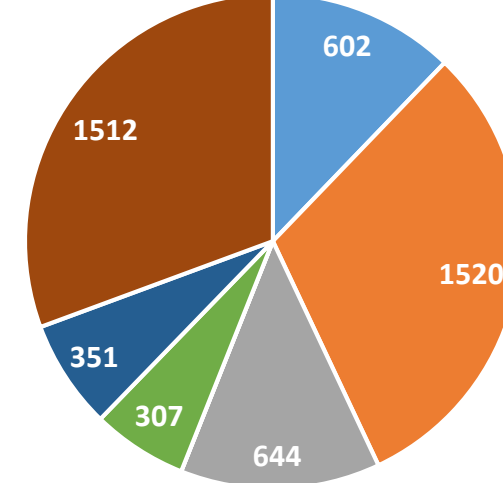
GES- C1: 2 386 MJ/ha/an



GES- C2: 3 737 MJ/ha/an



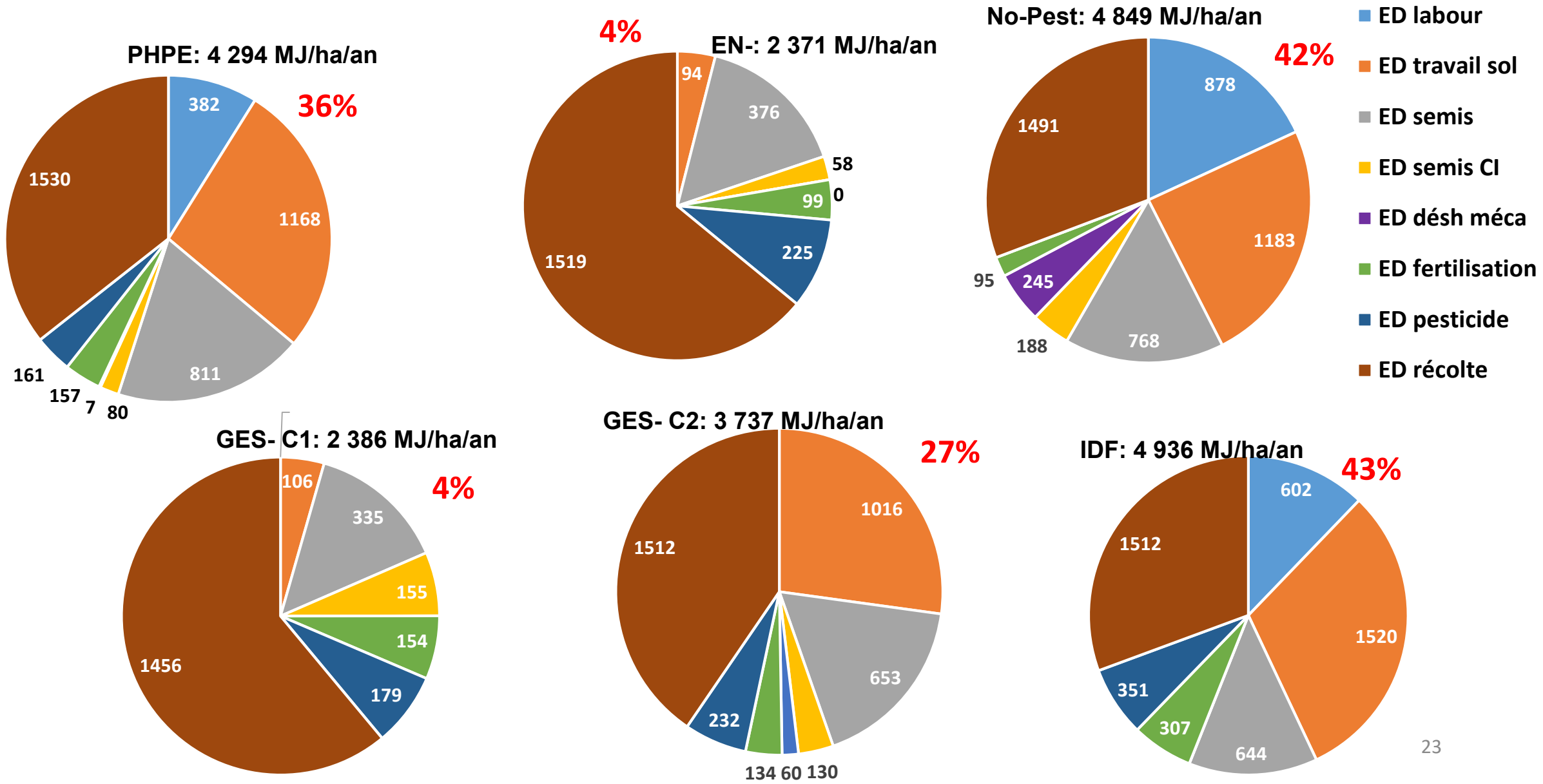
IDF: 4 936 MJ/ha/an



- ED labour
- ED travail sol
- ED semis
- ED semis CI
- ED désh méca
- ED fertilisation
- ED pesticide
- ED récolte

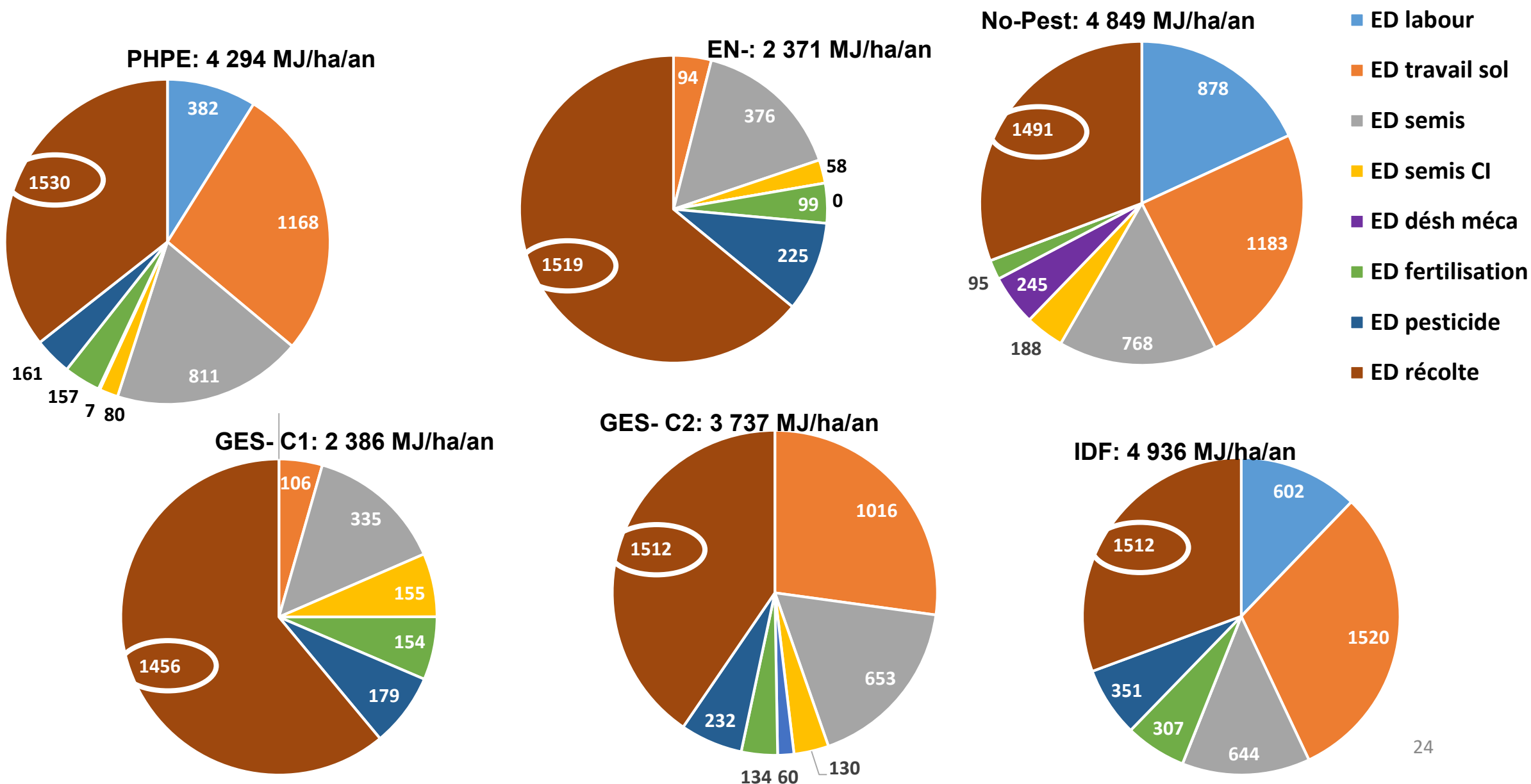
Consommation d'énergie directe

→ part variable du travail du sol, incluant le labour, selon sdc



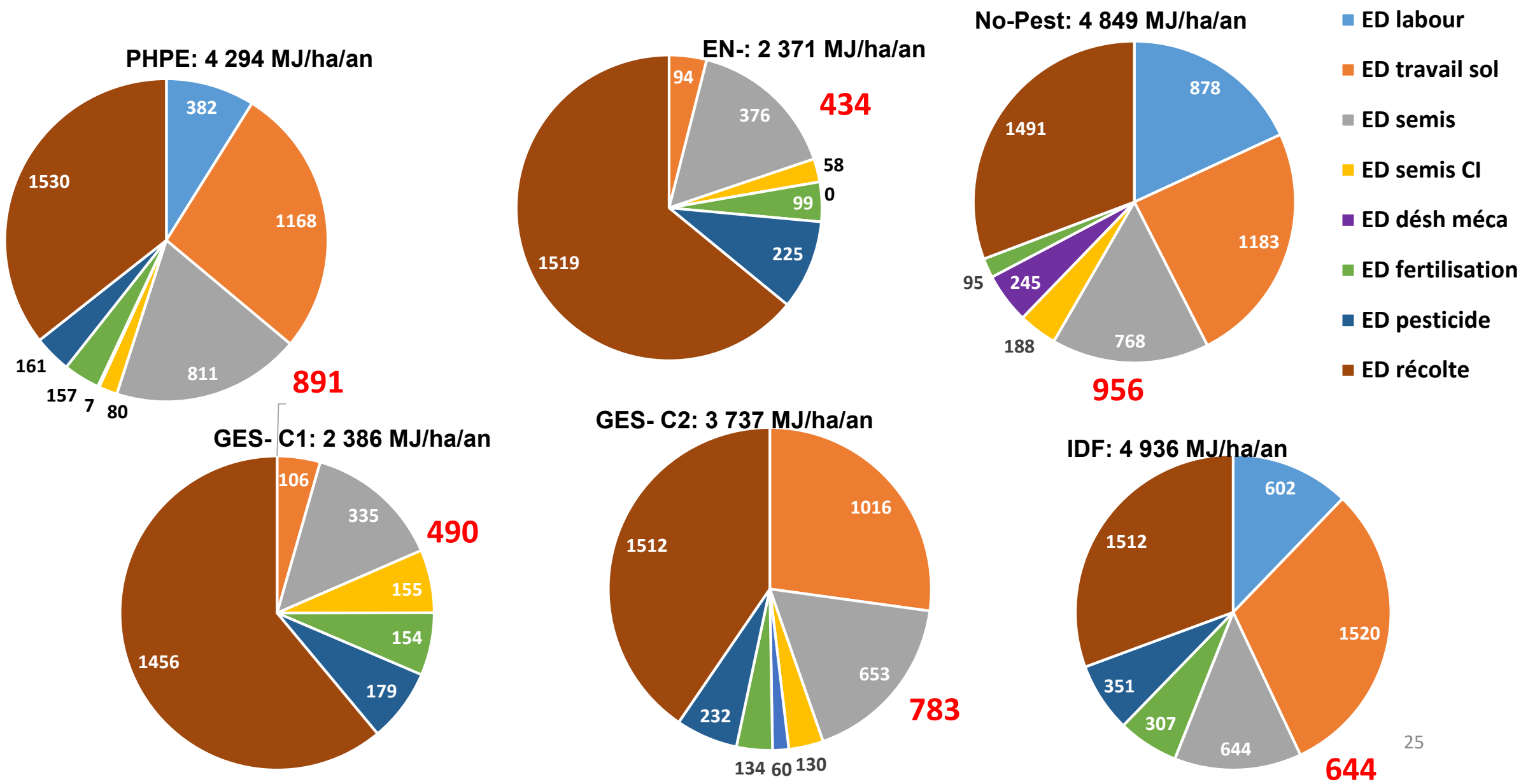
Consommations d'énergie directe

→ importance des récoltes dans tous les sdc (31% à 64%)



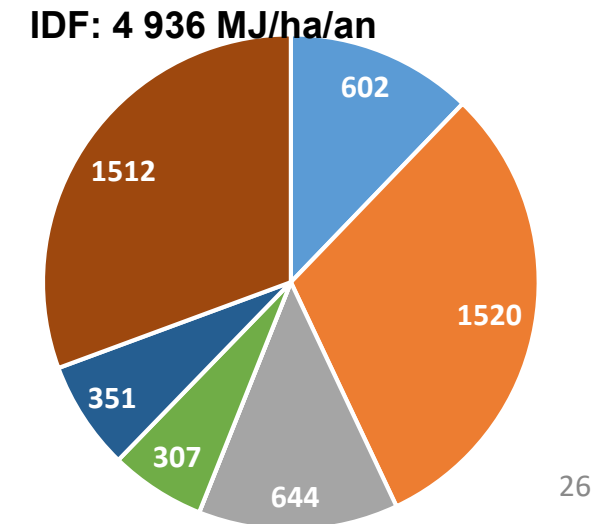
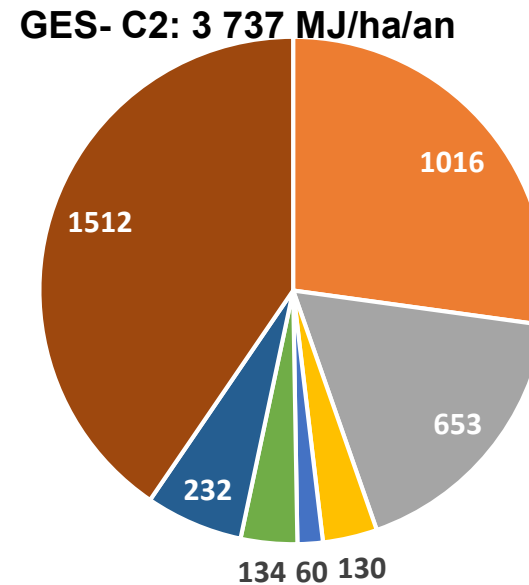
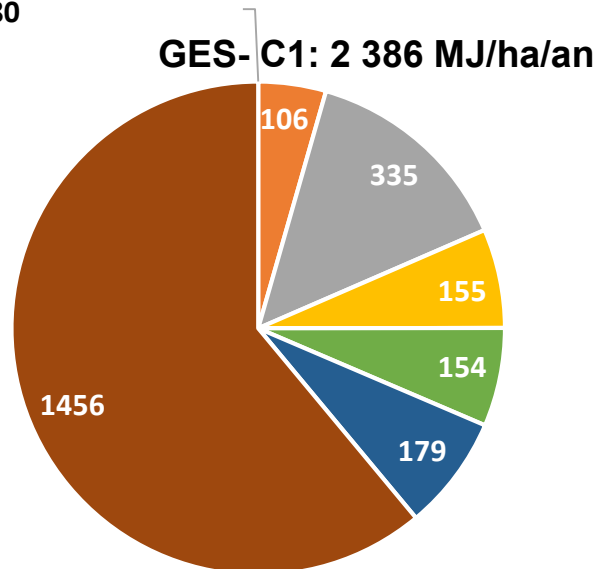
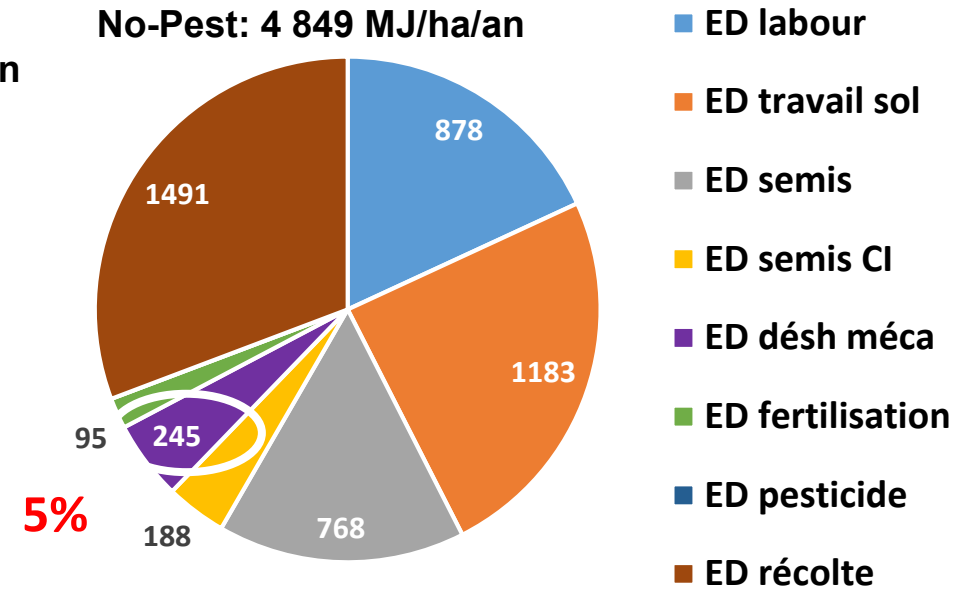
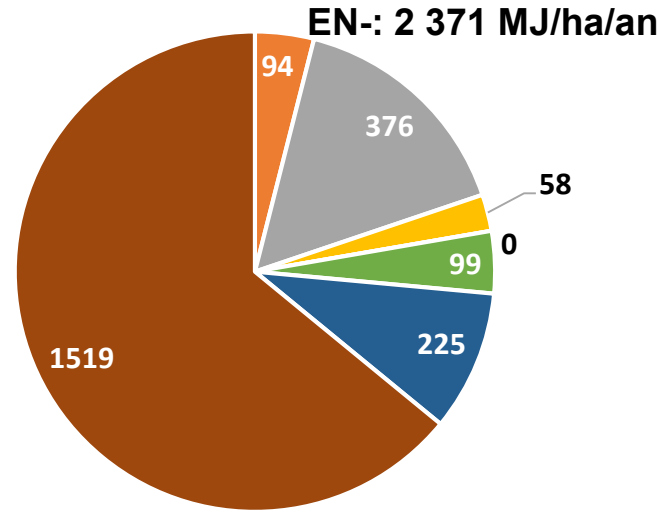
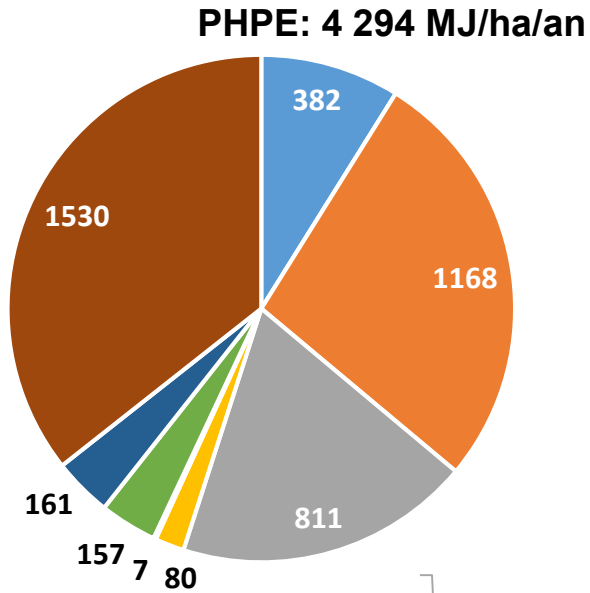
Consommations d'énergie directe

→ parts plus faibles des semis dans sdc EN- et GES-C1 (non travail du sol)



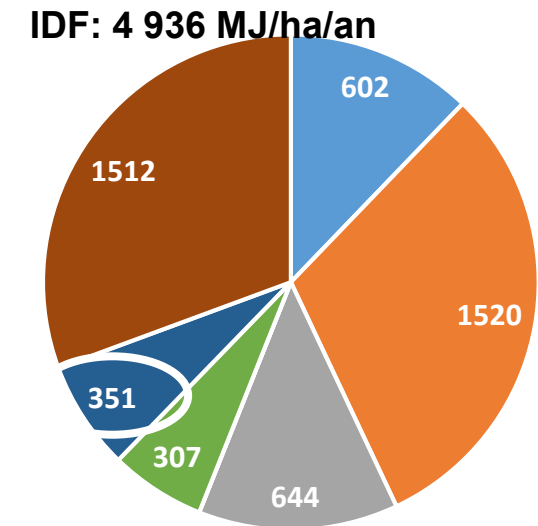
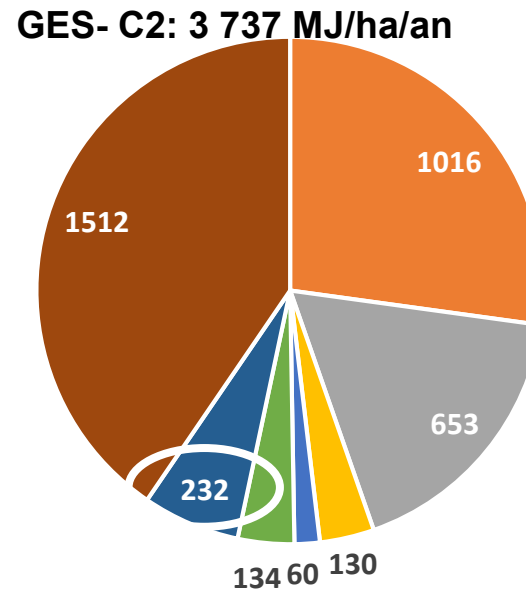
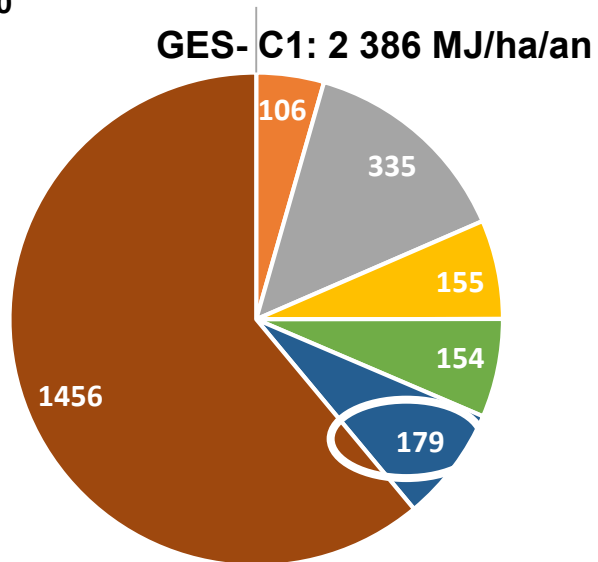
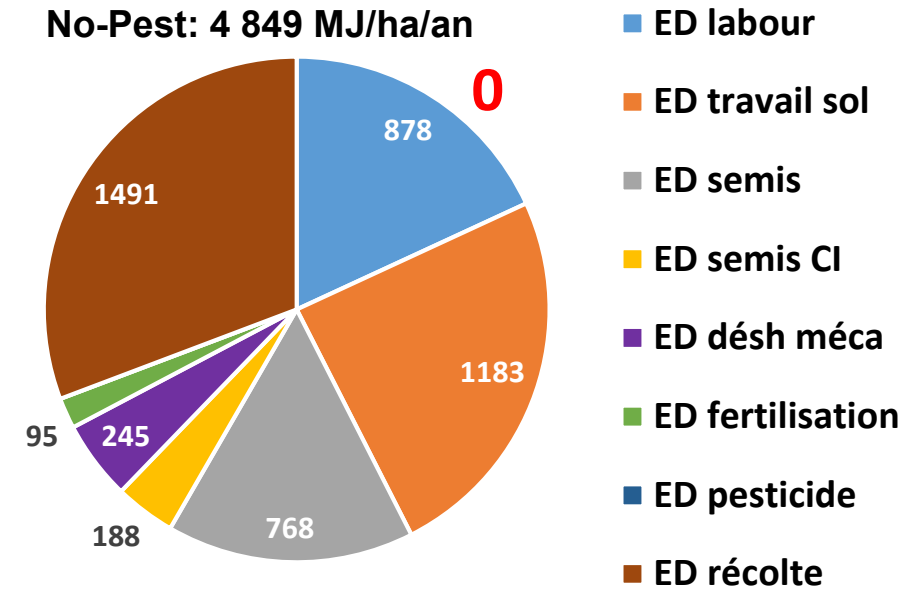
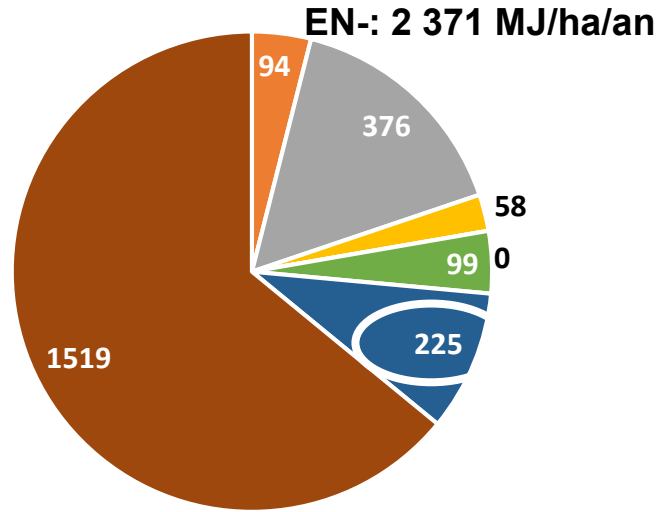
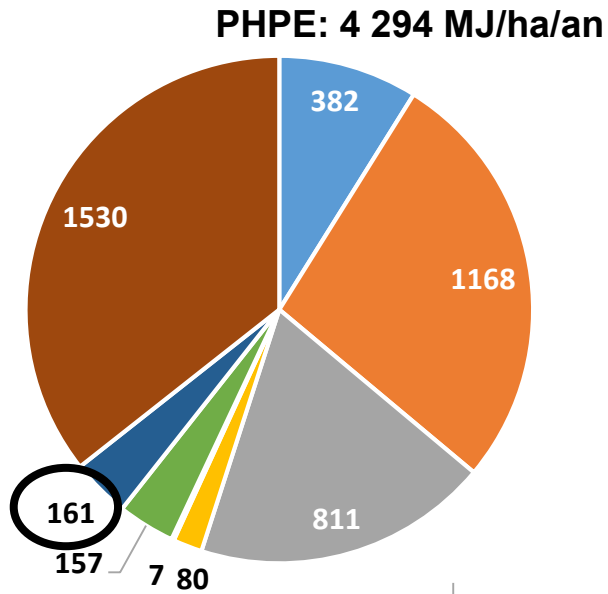
Consommation d'énergie directe : quelques spécificités

→ désherbage mécanique dans le sdc No-Pest

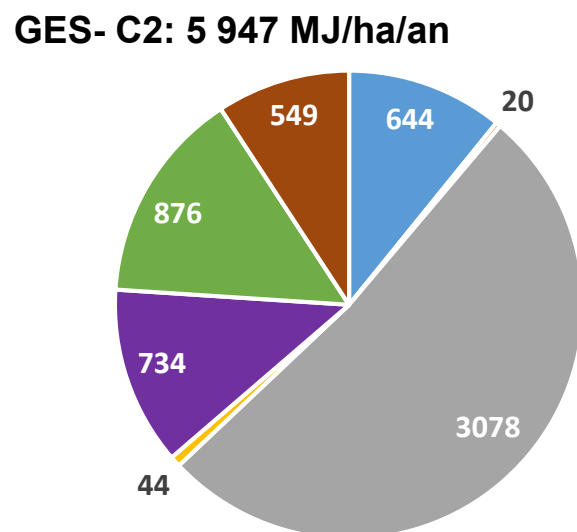
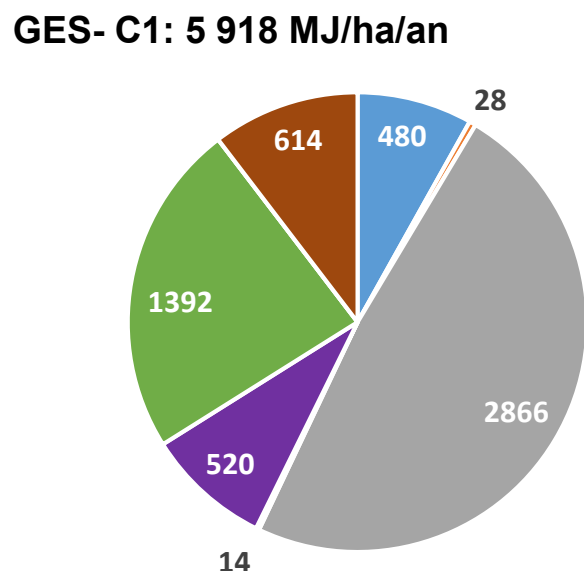
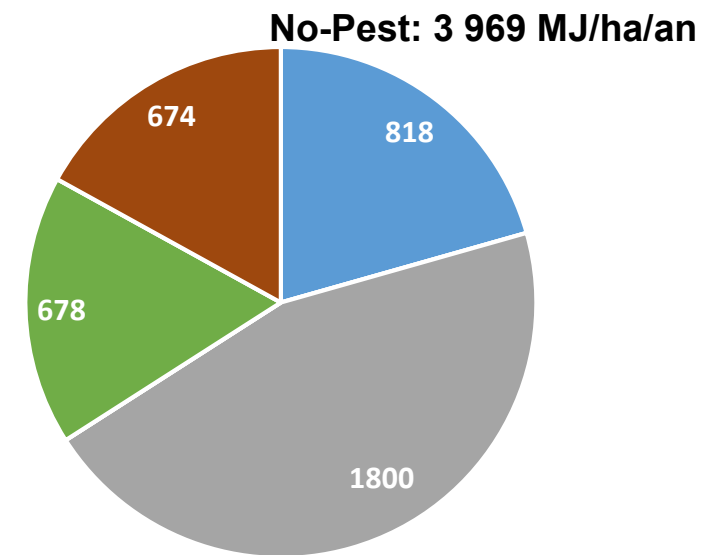
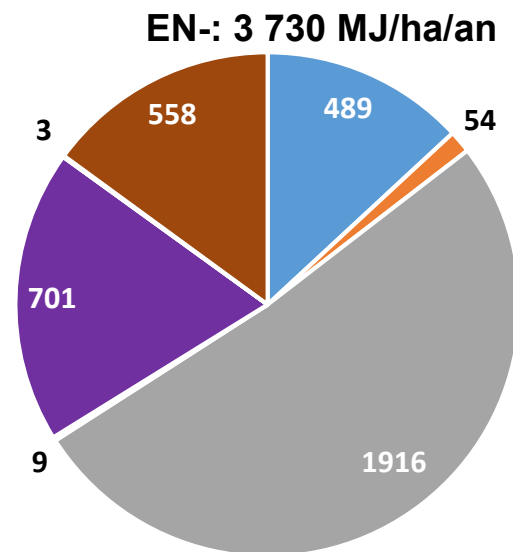
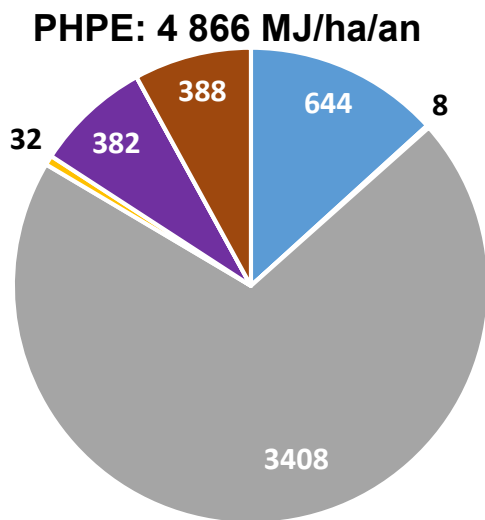


Consommation d'énergie directe : quelques spécificités

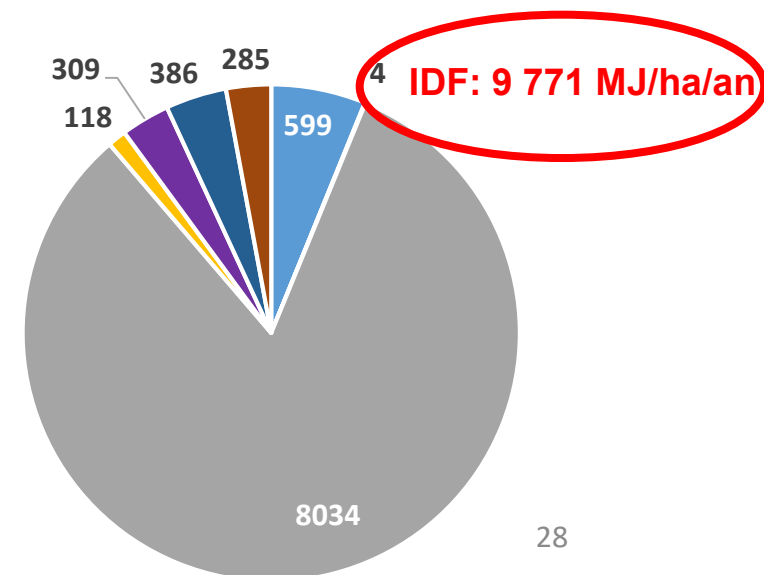
→ quantités variables liées aux apports de pesticides selon les sdc



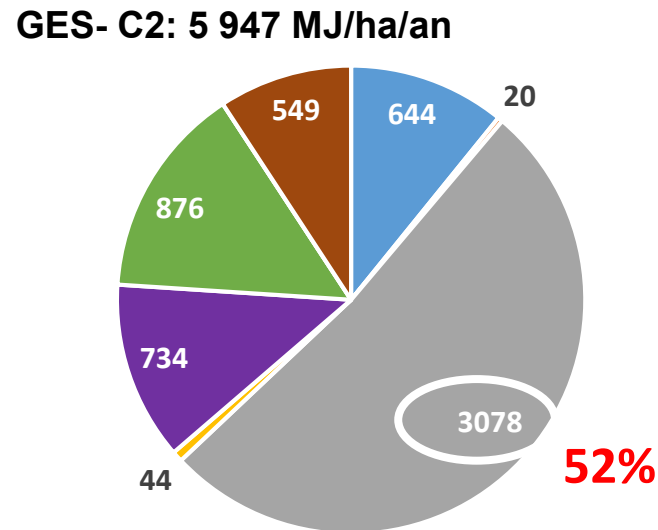
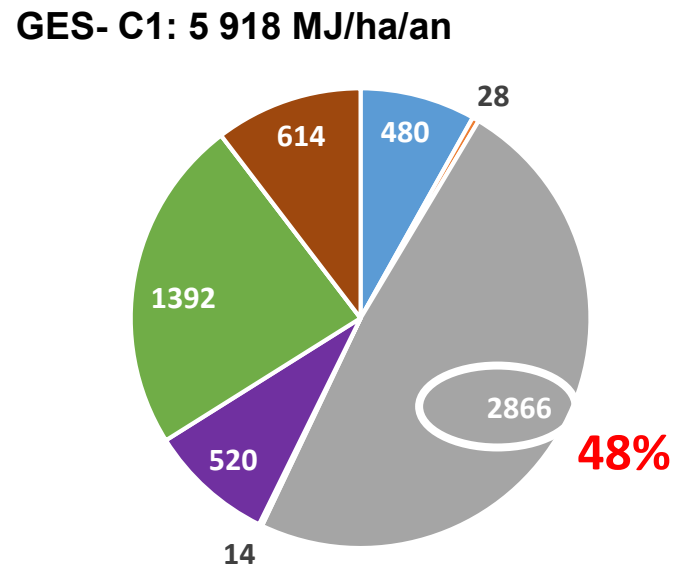
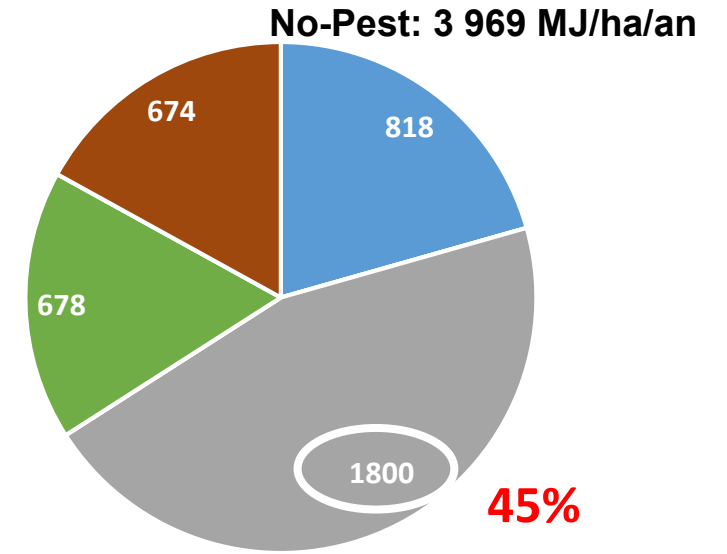
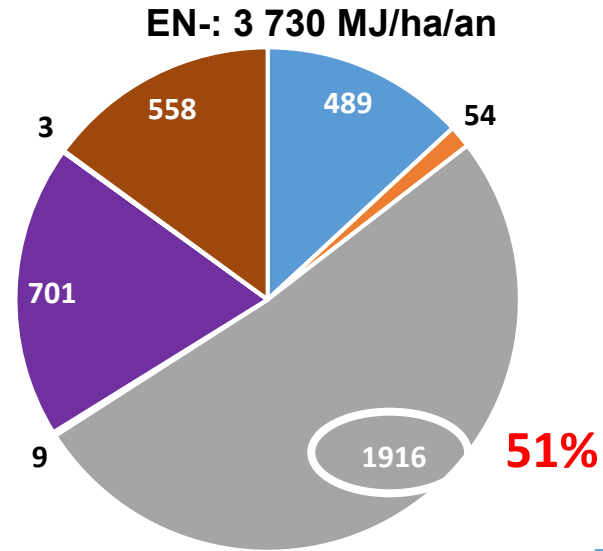
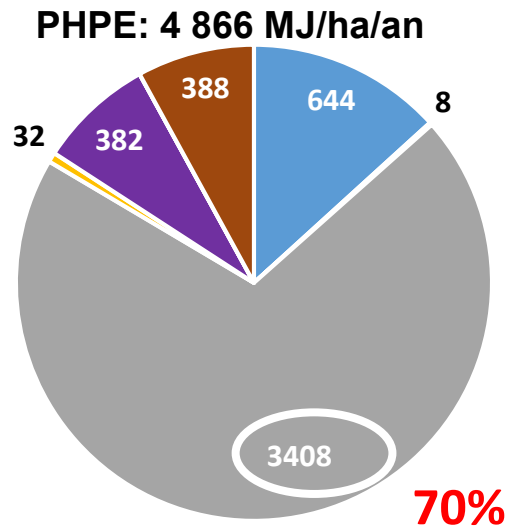
Consommation d'énergie indirecte, répartition entre postes → Quantités beaucoup plus élevées dans les sdc locaux



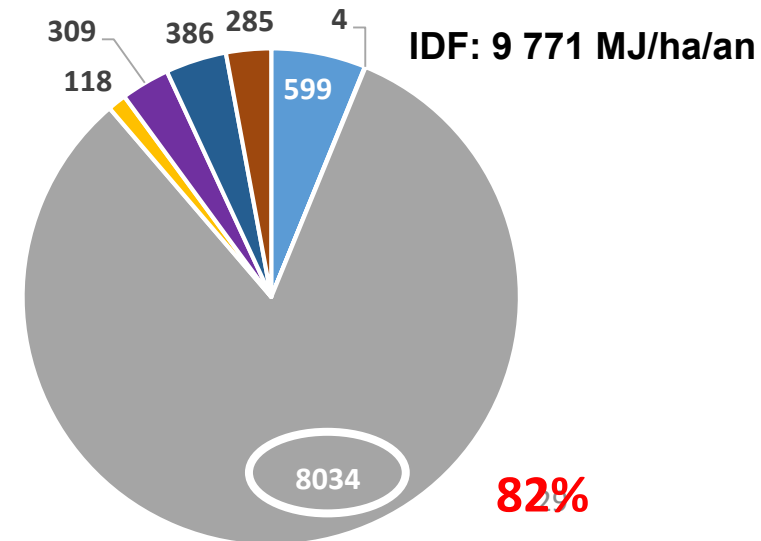
- EiD opérations culturales
- EiD antilimaces
- EiD fertilisation
- EiD fongicide
- EiD herbicide
- EiD sèchage
- EiD régulateur
- EiD semences



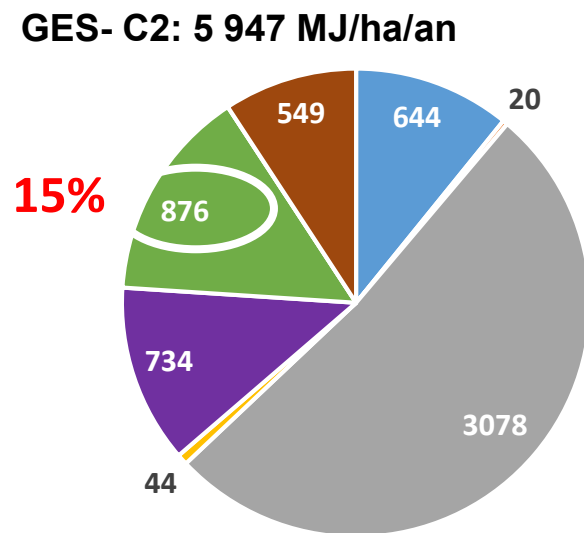
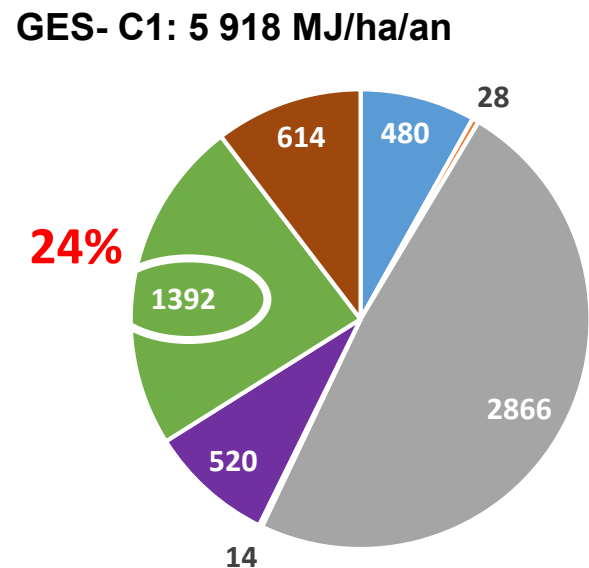
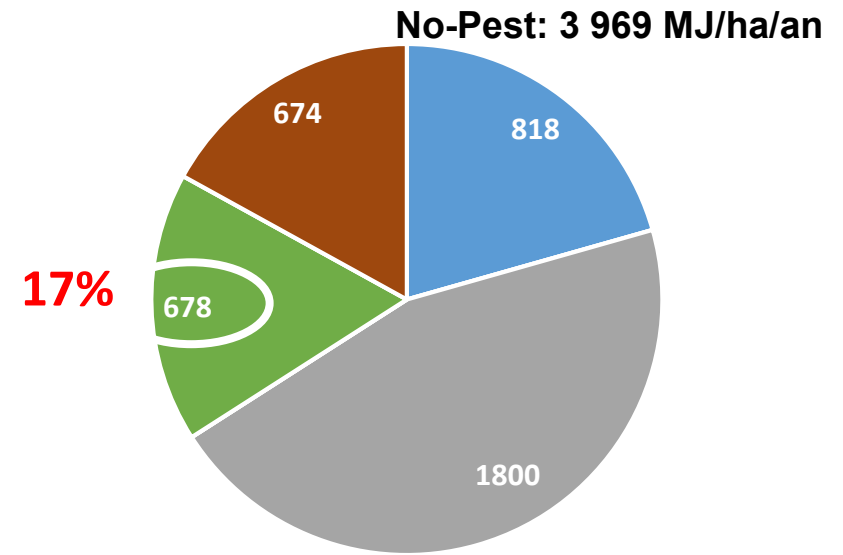
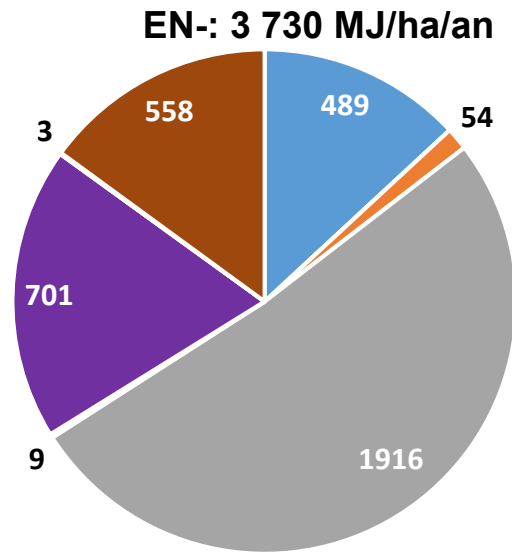
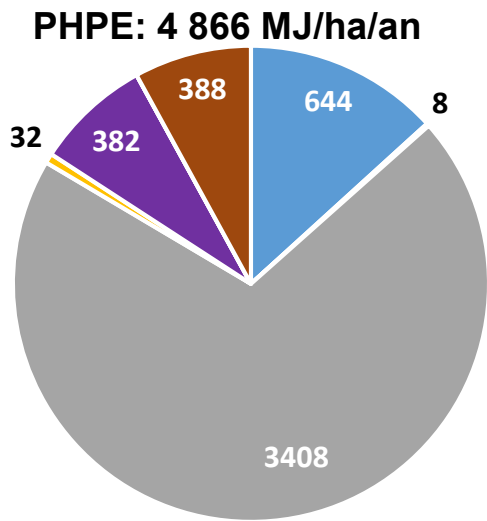
Consommation d'énergie indirecte → Part importante liée à la fertilisation azotée



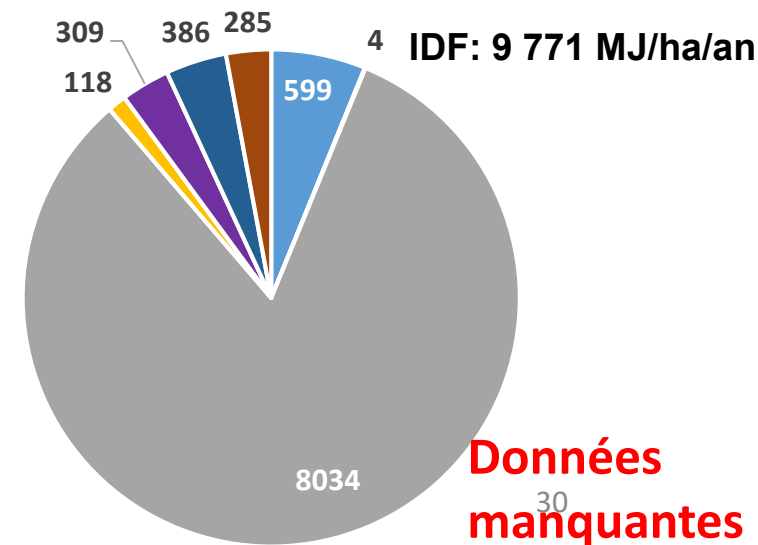
- EiD opérations culturales
- EiD antilimaces
- EiD fertilisation
- EiD fongicide
- EiD herbicide
- EiD sècheage
- EiD régulateur
- EiD semences



Consommation d'énergie indirecte → Part élevée liée au séchage des grains de maïs

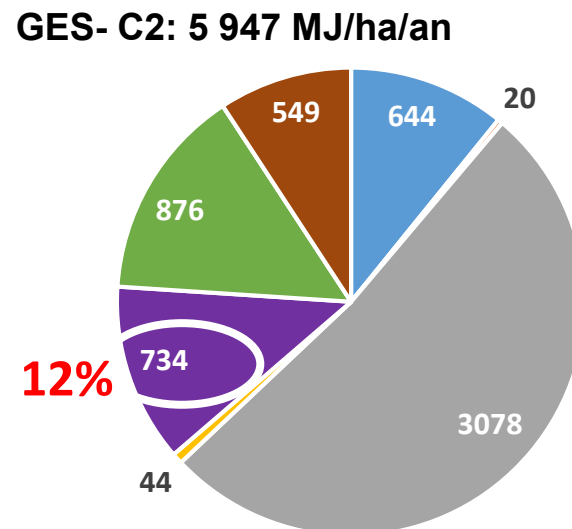
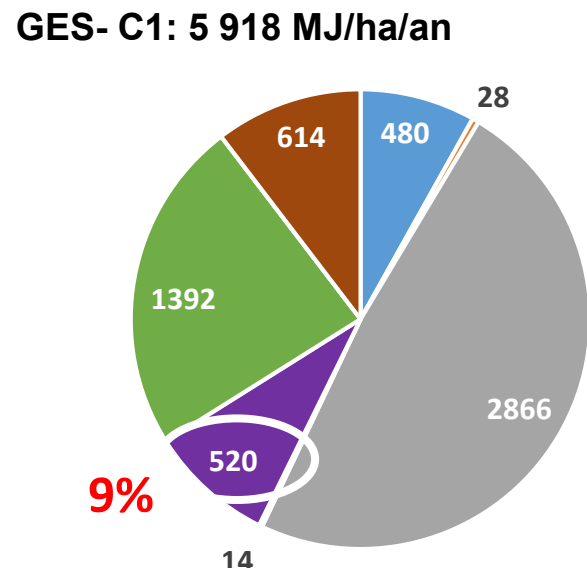
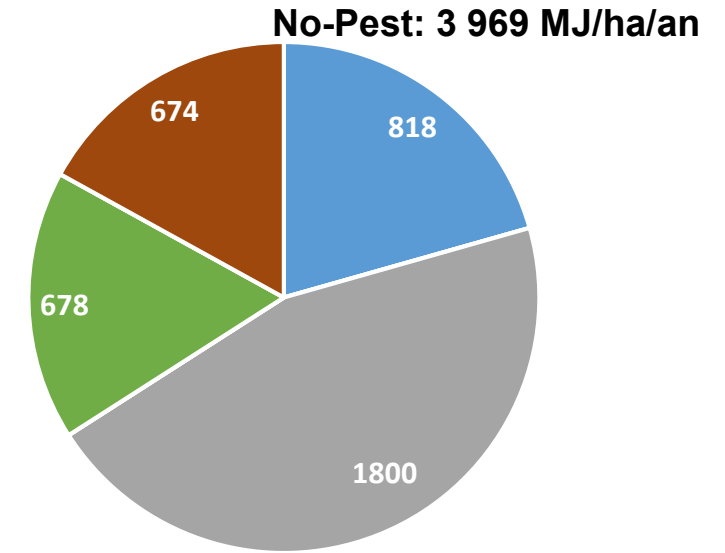
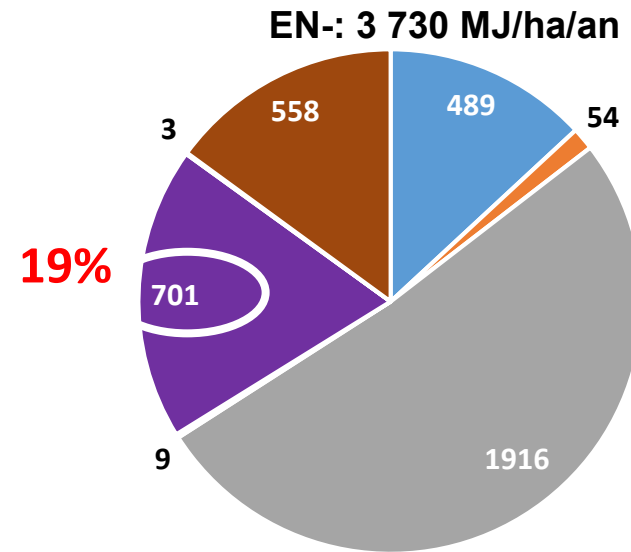
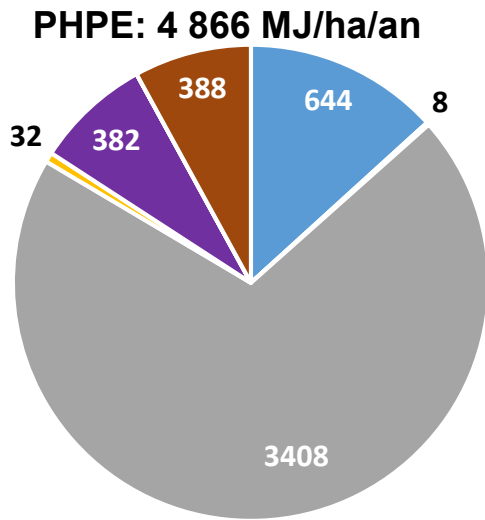


- EiD opérations culturales
- EiD antilimaces
- EiD fertilisation
- EiD fongicide
- EiD herbicide
- EiD séchage
- EiD régulateur
- EiD semences

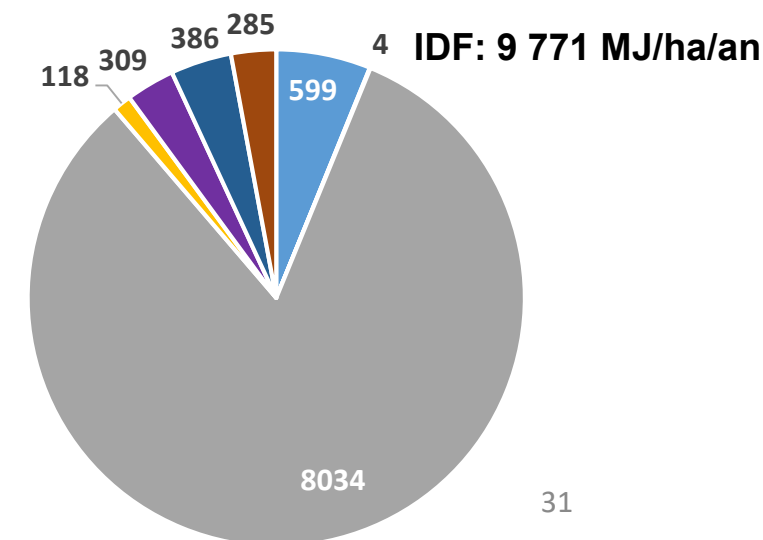


Consommation d'énergie indirecte

→ **Importance liée aux herbicides** (sdci sans travail du sol)

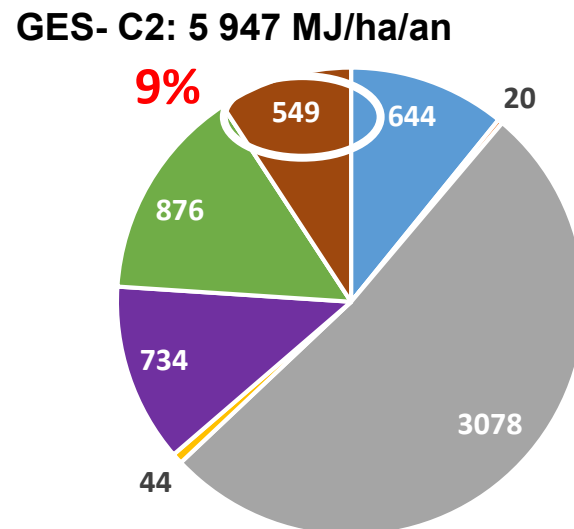
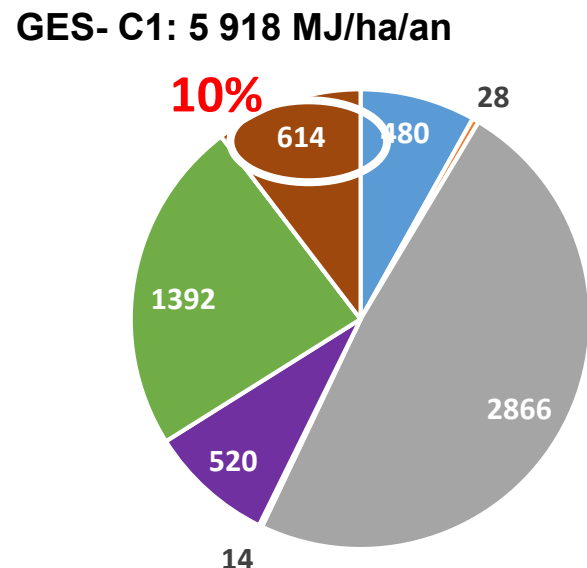
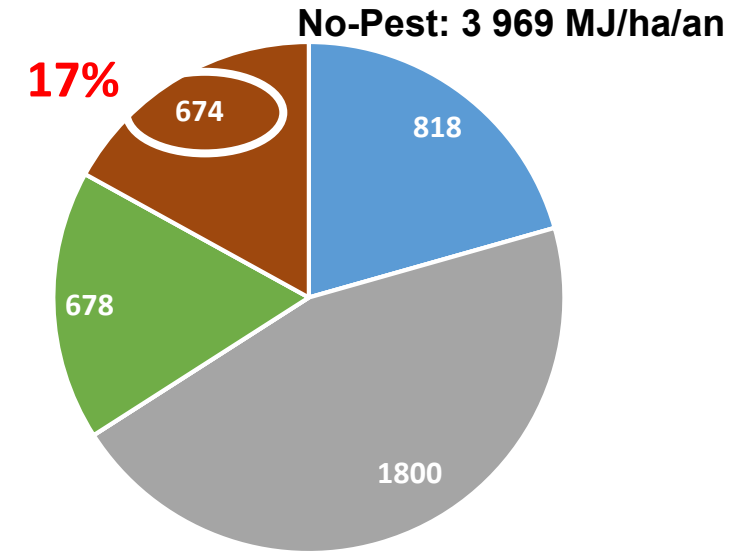
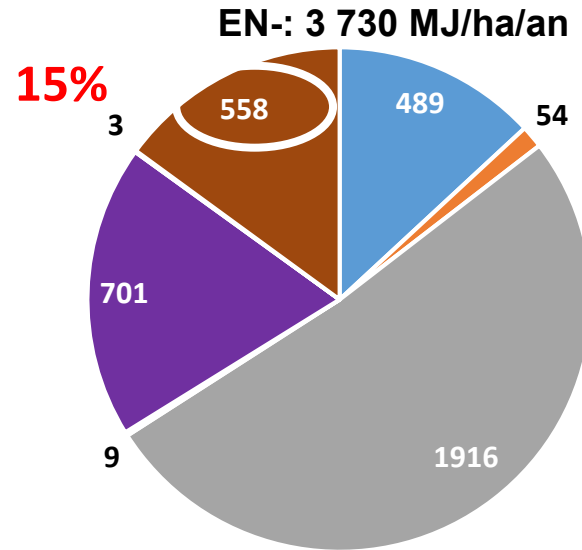
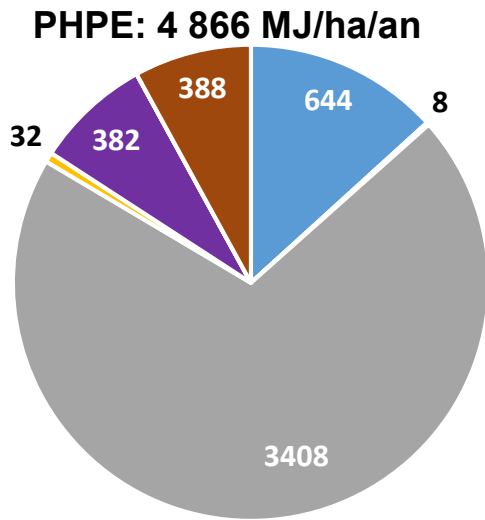


- EiD opérations culturales
- EiD antilimaces
- EiD fertilisation
- EiD fongicide
- EiD herbicide
- EiD sèche
- EiD régulateur
- EiD semences

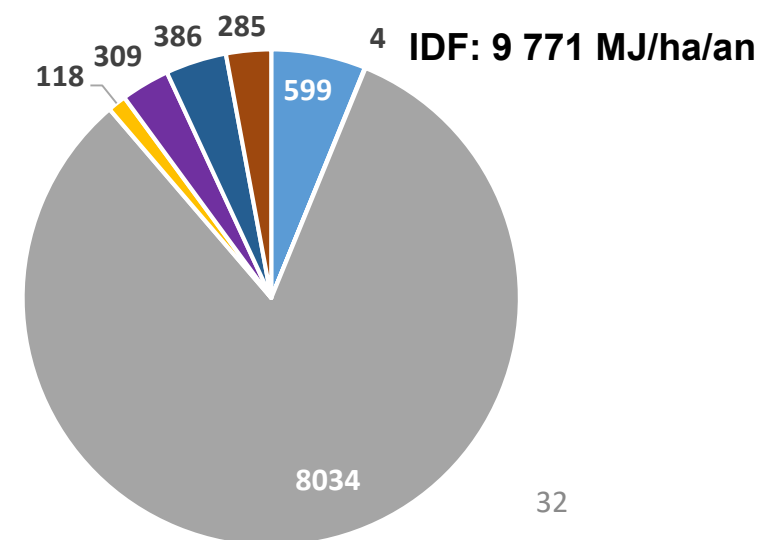


Consommation d'énergie indirecte

→ plus élevées pour les semences dans les sdc No-Pest, GES- et EN-

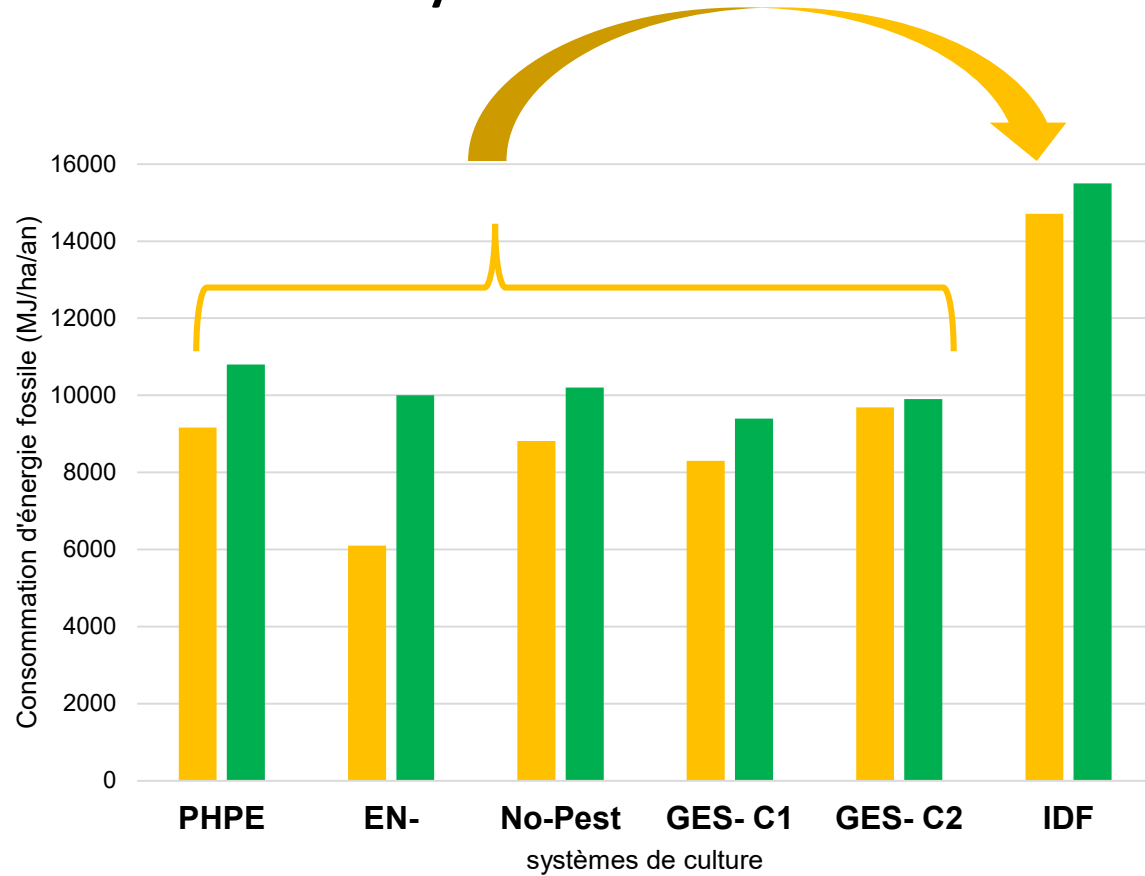


- EiD opérations culturales
- EiD antilimaces
- EiD fertilisation
- EiD fongicide
- EiD herbicide
- EiD sèchage
- EiD régulateur
- EiD semences



→ **Consommations d'énergie totale des sdci très inférieures aux sdc locaux**
→ **Consommation du sdc EN- beaucoup plus faible**

Réduction moyenne: -43%

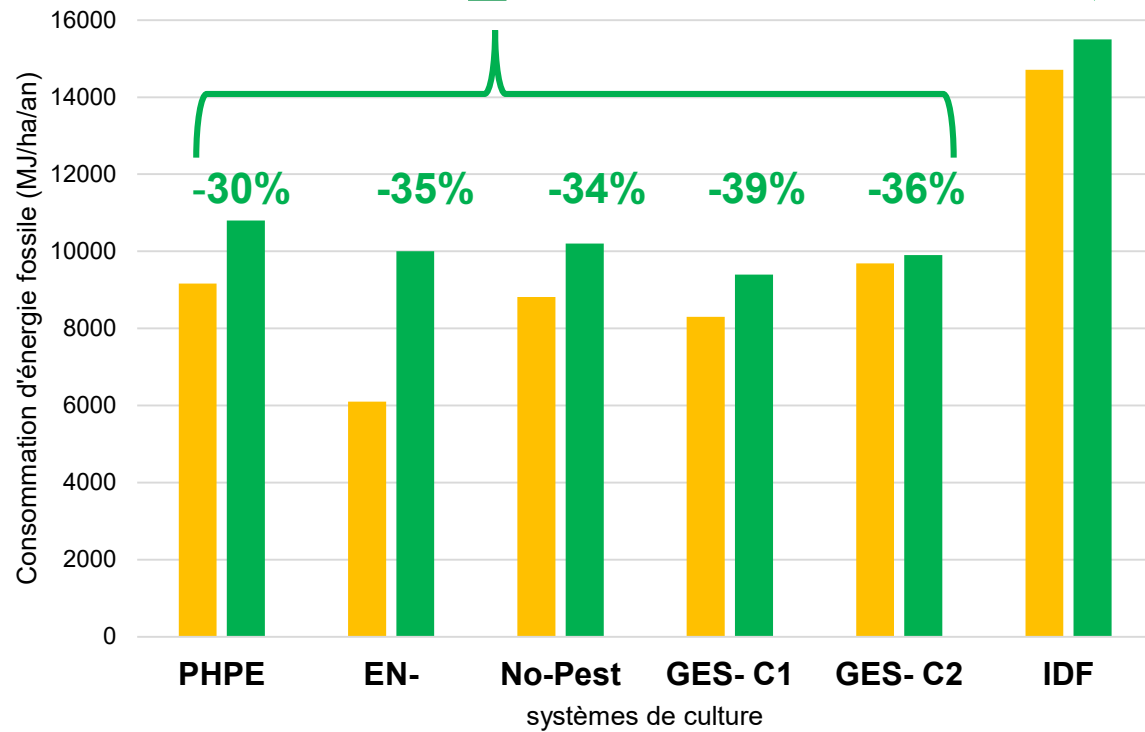


■ **Consommation d'énergie totale (MJ/ha/an)**

■ **Production d'énergie / 10 (MJ/ha/an)**

→ Productions énergétiques des sdc inférieures aux sdc locaux

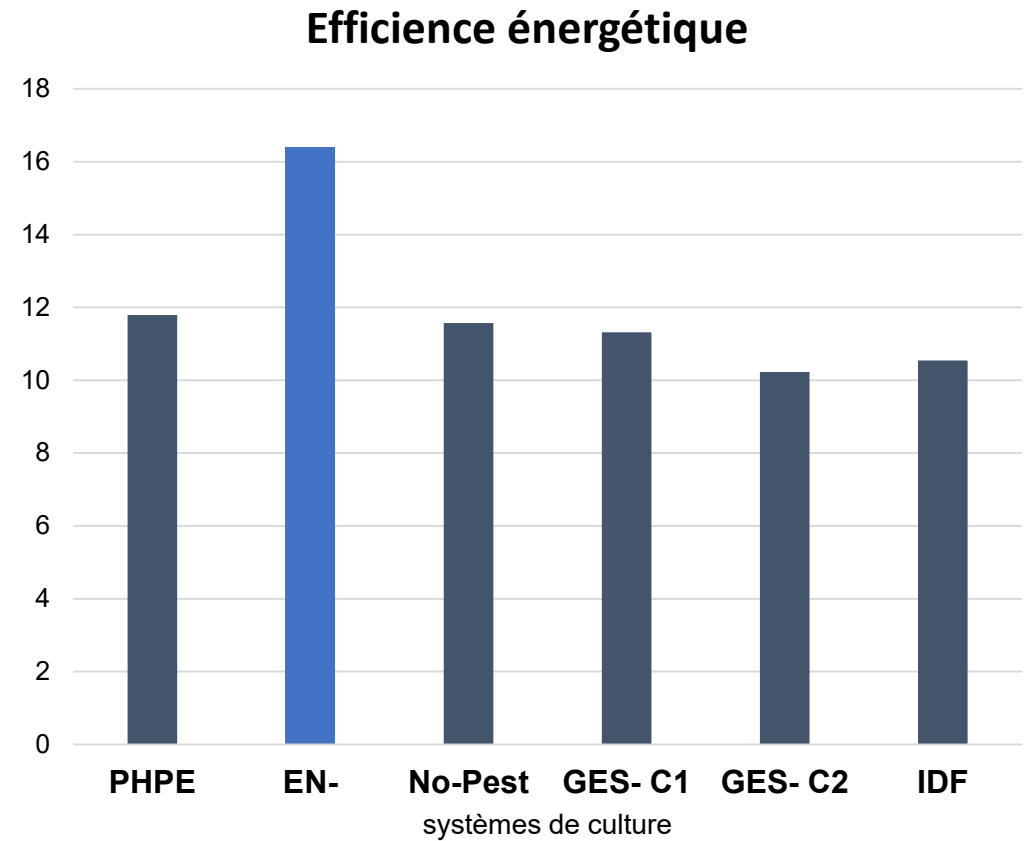
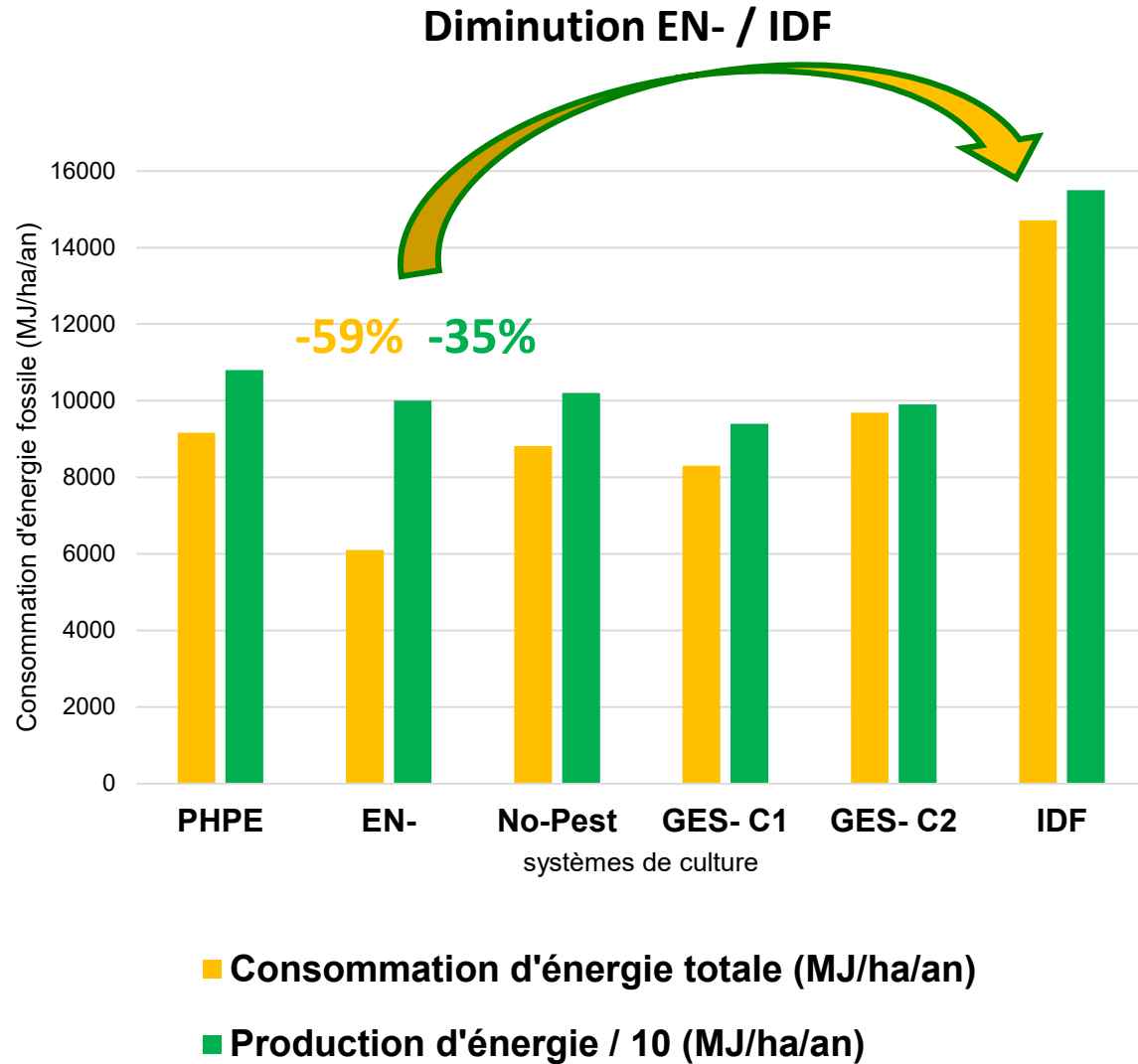
Réduction moyenne: -35%



■ Consommation d'énergie totale (MJ/ha/an)

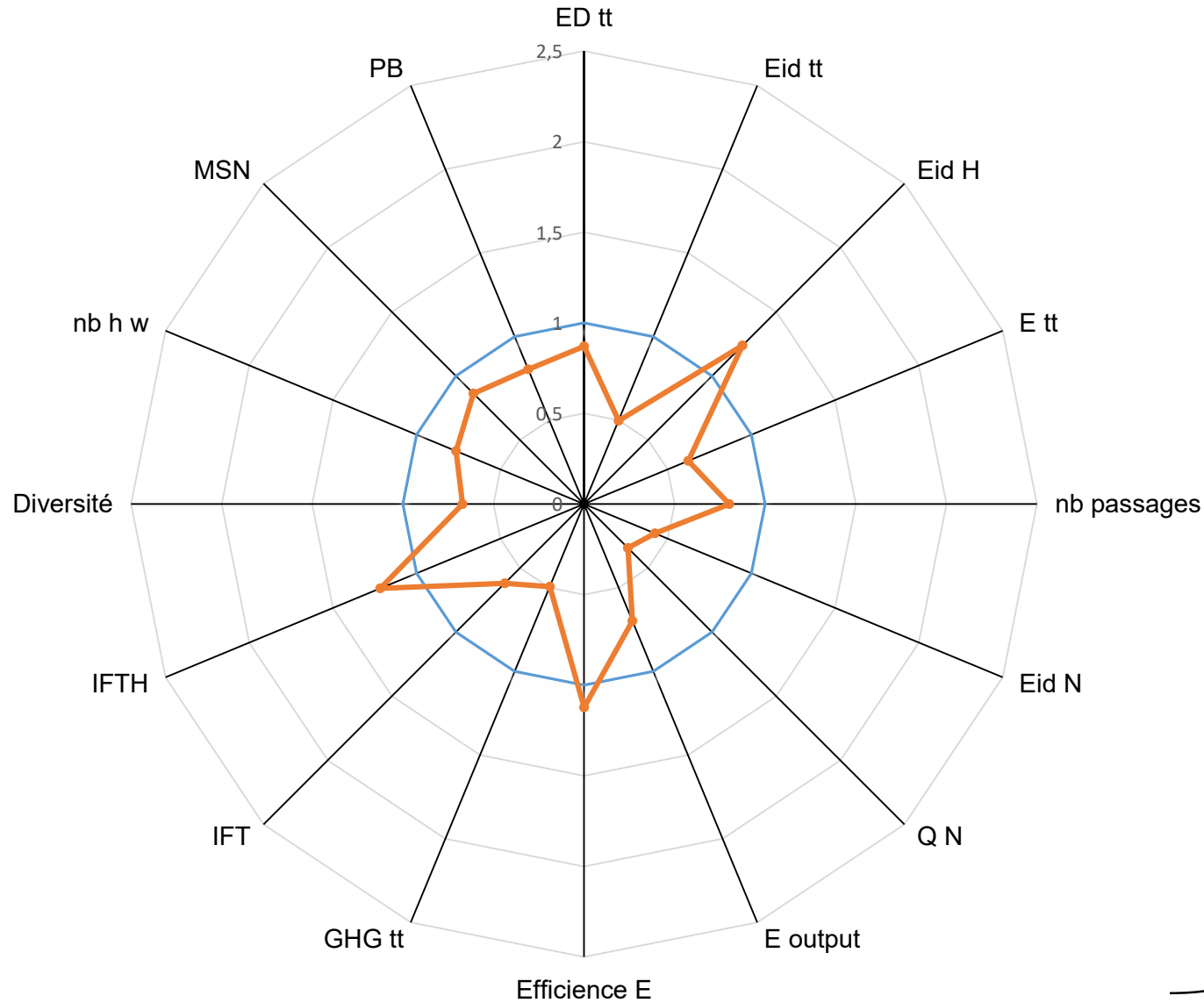
■ Production d'énergie / 10 (MJ/ha/an)

→ **Efficiéce énérgétique plus élevée du sdcí EN- par rapport aux autres sdc**



Ratio des performances entre le sdci PHPE et les sdc locaux

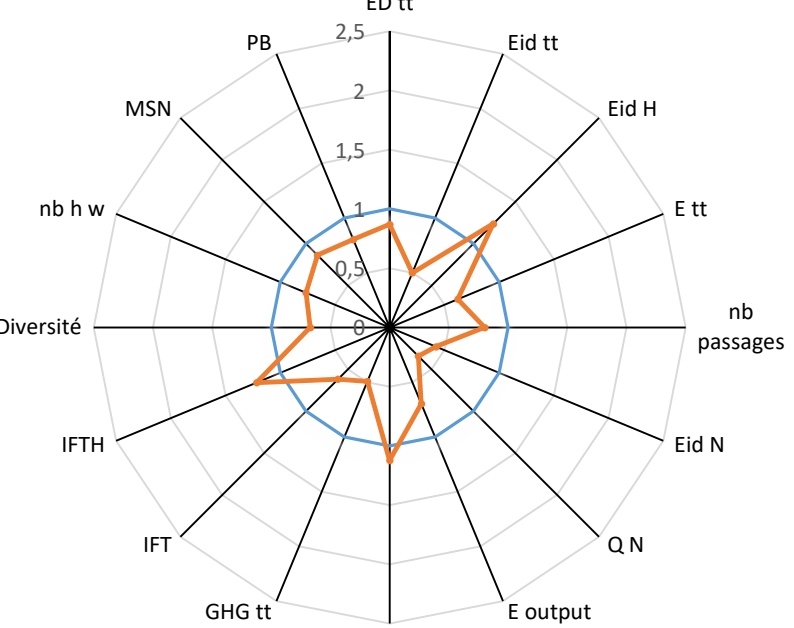
— PHPE 11 ANS / IDF



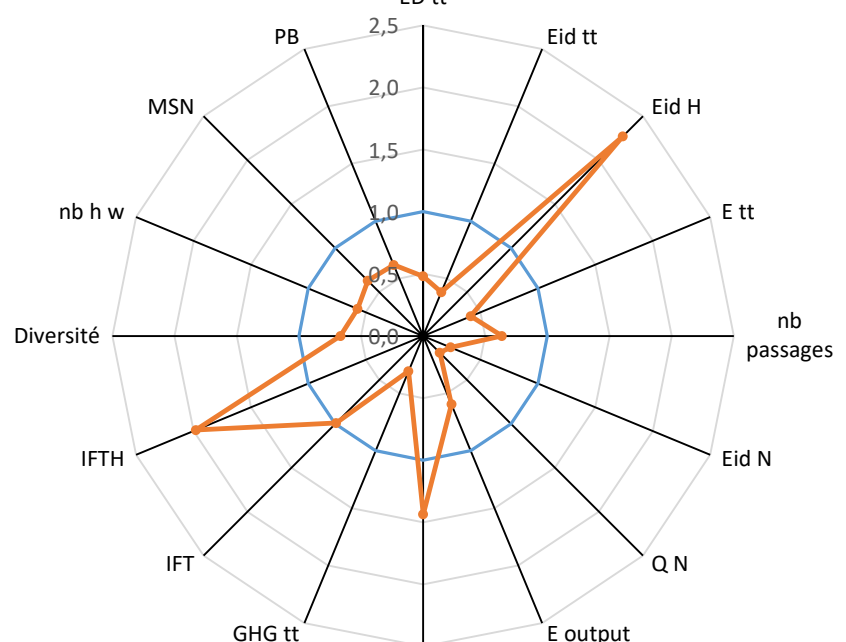
Indicateurs
énergétiques

- ED tt: énergie directe
- Eid tt: énergie indirecte
- Eid H: énergie indirecte herbicide
- E tt: énergie totale
- Eid N: énergie indirecte N
- Q N: quantité N
- E output: production d'énergie
- Efficiency E: efficacité énergétique
- GHG tt: émissions de GES totale
- IFTH: IFT herbicides
- Nb h w: nombre d'heures de travail
- MSN: marge semi-nette
- PB: produit brut

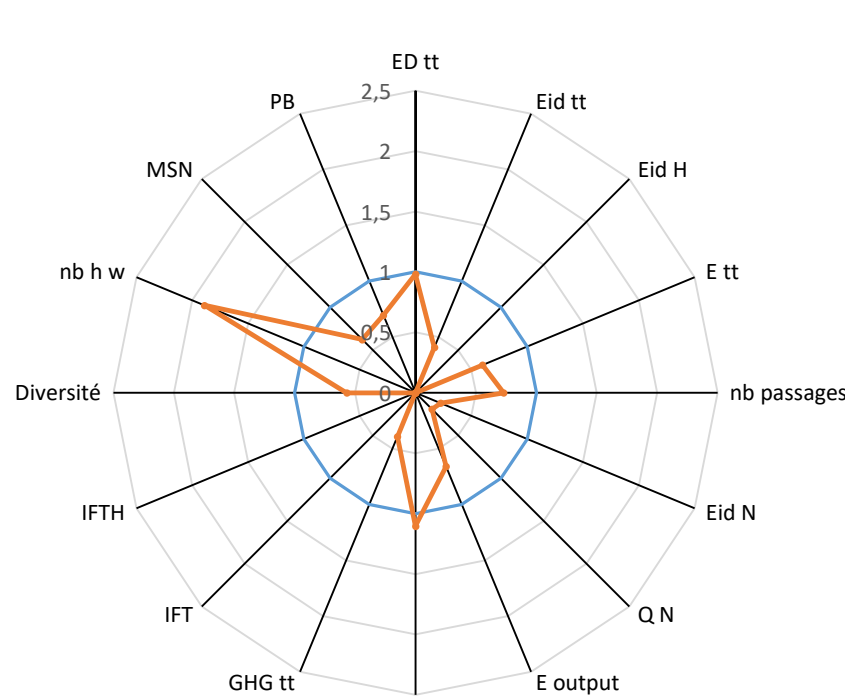
— PHPE 11 ANS / IDF



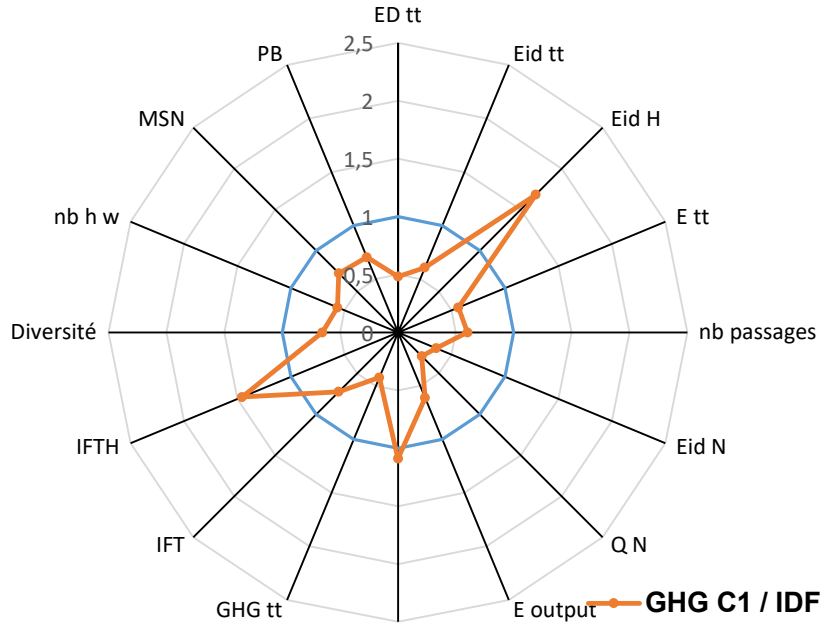
— EN- 11ans/ IDF



— No-Pest 11 ANS/ IDF



ED tt: énergie directe totale
 Eid tt: énergie indirecte totale
 Eid H: énergie indirecte herbicide
 E tt: énergie totale
 Eid N: énergie indirecte N
 Q N: quantité N
 E output: production d'énergie
 Effizienz E: efficacité énergétique
 GHG tt: émissions de GES totale
 IFTH: IFT herbicides
 Nb h w: nombre d'heures de travail
 MSN: marge semi-nette
 PB: produit brut

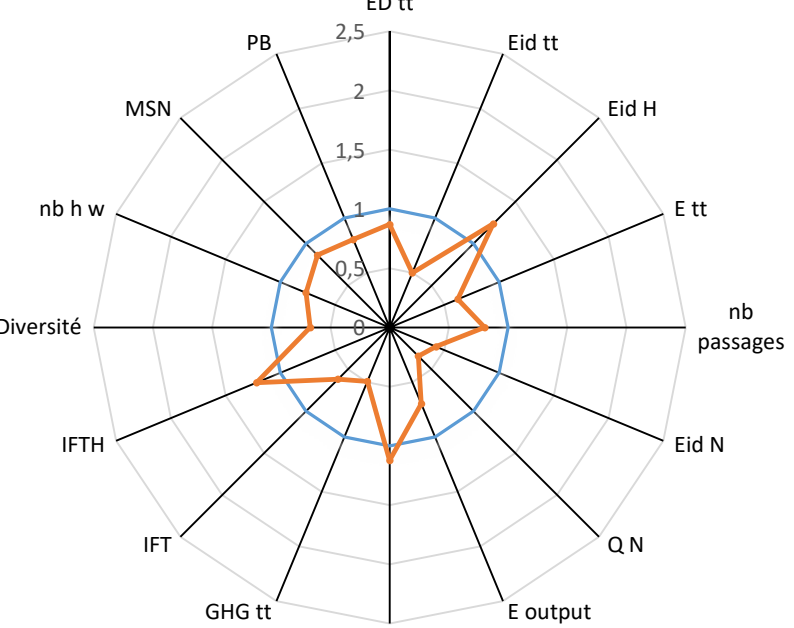


— GHG C1 / IDF

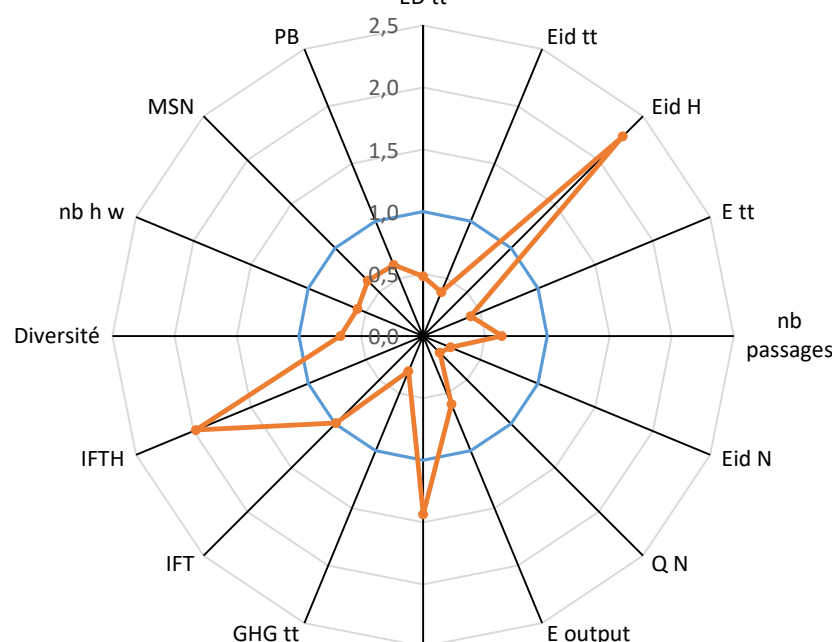
Critères environnementaux

- *Meilleures performances énergétiques pour les sdci (excepté Eid H dans sdci EN- et GES-)
- *Efficacités énergétiques plus élevées pour les sdci
- *Moins d'émissions de GES dans les sdci
- *IFT plus faibles dans les sdci, mais IFTH plus élevés (excepté dans sdci No-Pest)
- *Diversité des espèces plus forte dans les sdci
- *Nombres de passages et d'heures de travail inférieurs dans sdci

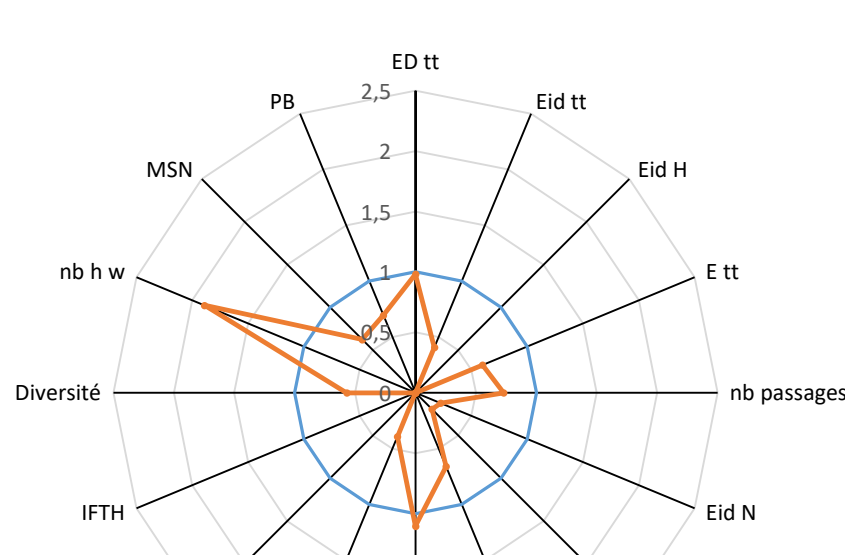
— PHPE 11 ANS / IDF



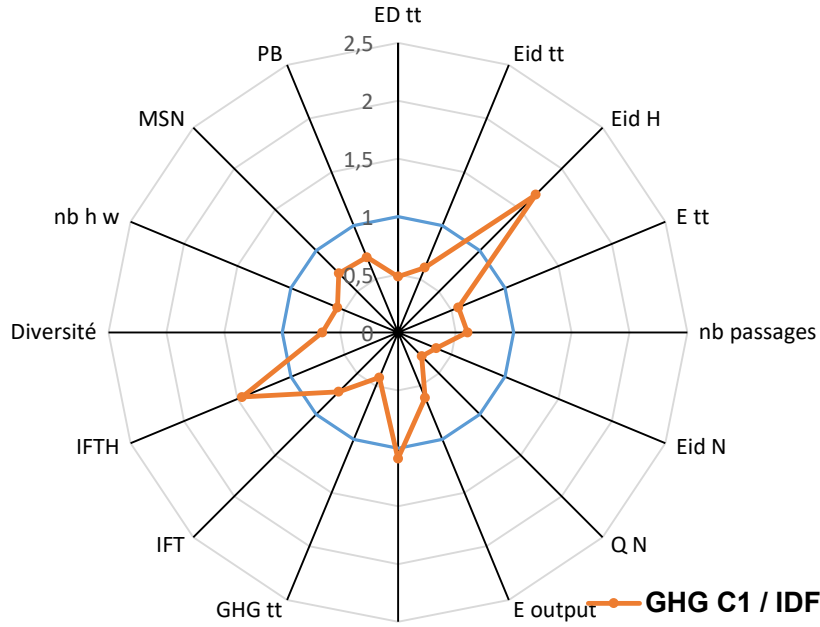
— EN- 11ans/ IDF



— No-Pest 11 ANS/ IDF



ED tt: énergie directe totale
 Eid tt: énergie indirecte totale
 Eid H: énergie indirecte herbicide
 E tt: énergie totale
 Eid N: énergie indirecte N
 Q N: quantité N
 E output: production d'énergie
 Efficienne E: efficacité énergétique
 GHG tt: émissions de GES totale
 IFTH: IFT herbicides
 Nb h w: nombre d'heures de travail
 MSN: marge semi-nette
 PB: produit brut

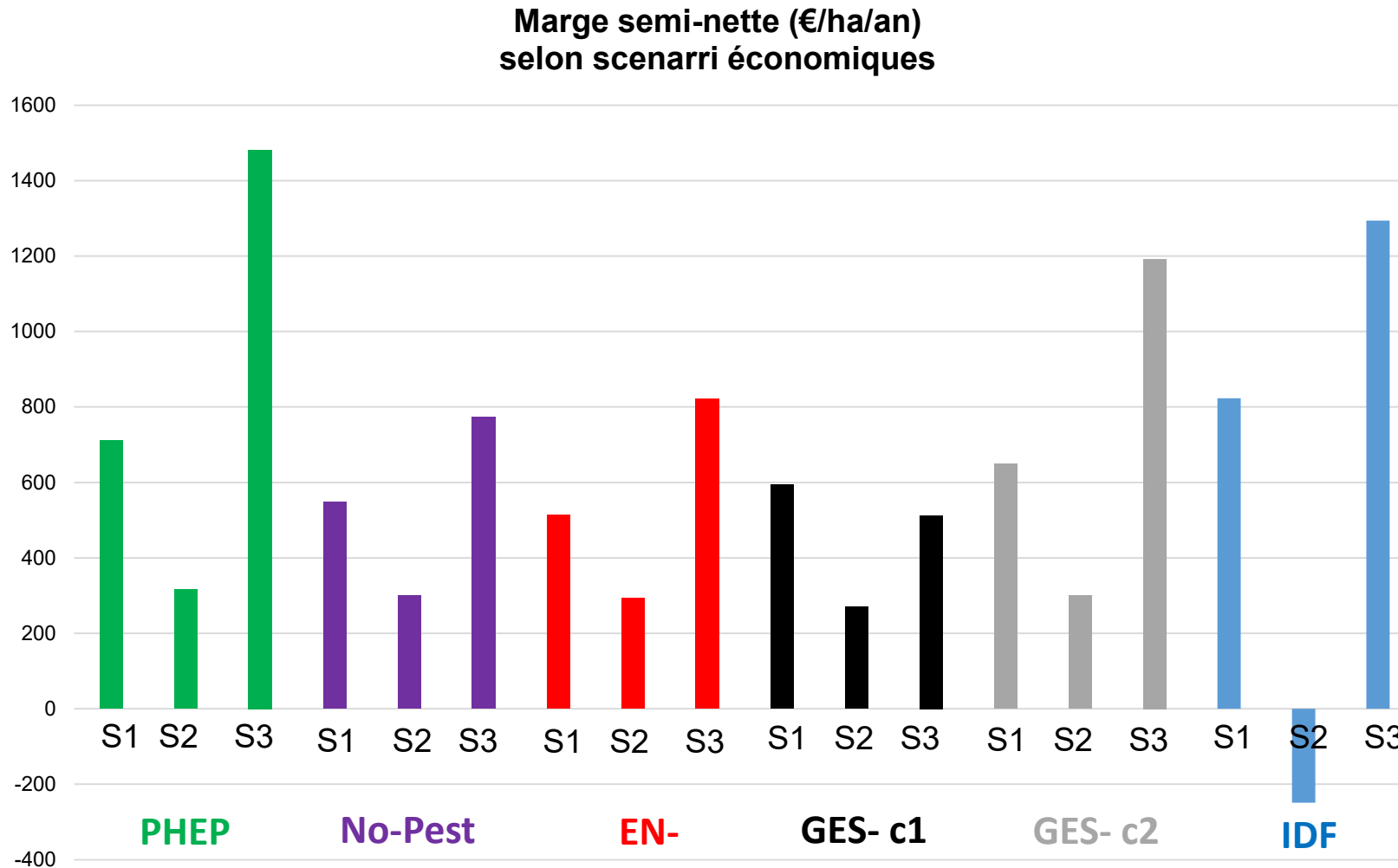


— GHG C1 / IDF

Critères économiques : MSN et PB
 *Meilleures performances pour les sdc locaux **MAIS**
 attention au scénario économique (prix représentatifs de la période 2012-2016)

Performances économiques selon différents scénarii économiques

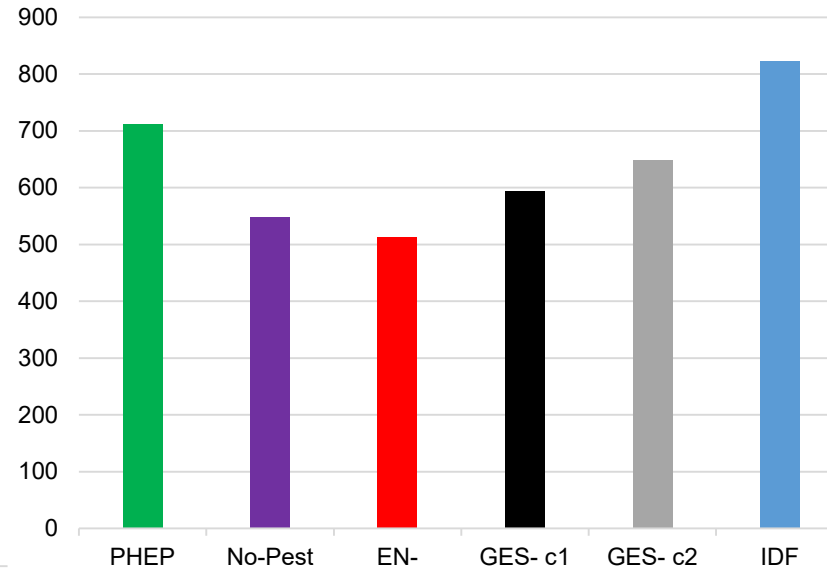
→ grandes variabilités des MSN selon les scénarii



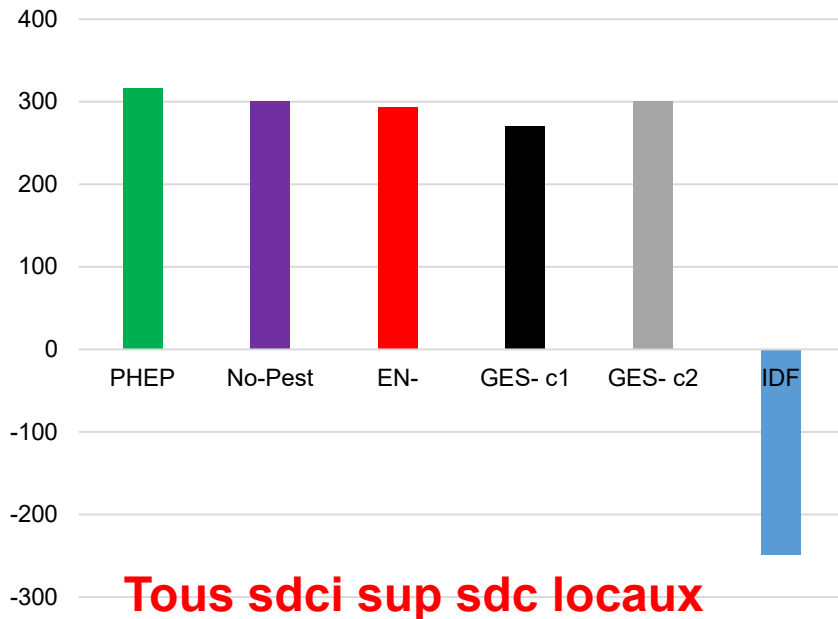
S1 : prix de vente et d'achat des intrants représentatifs de la période 2012-2016
 S2 : prix de vente représentatifs période 2012-2016, et prix du fuel et N de 2022 (hauts)
 S3 : prix représentatifs de 2022 (prix de vente et prix d'achat des intrants hauts)

→ Marges semi-nettes supérieures des sdci que celles des sdc locaux dans scénarii extrêmes

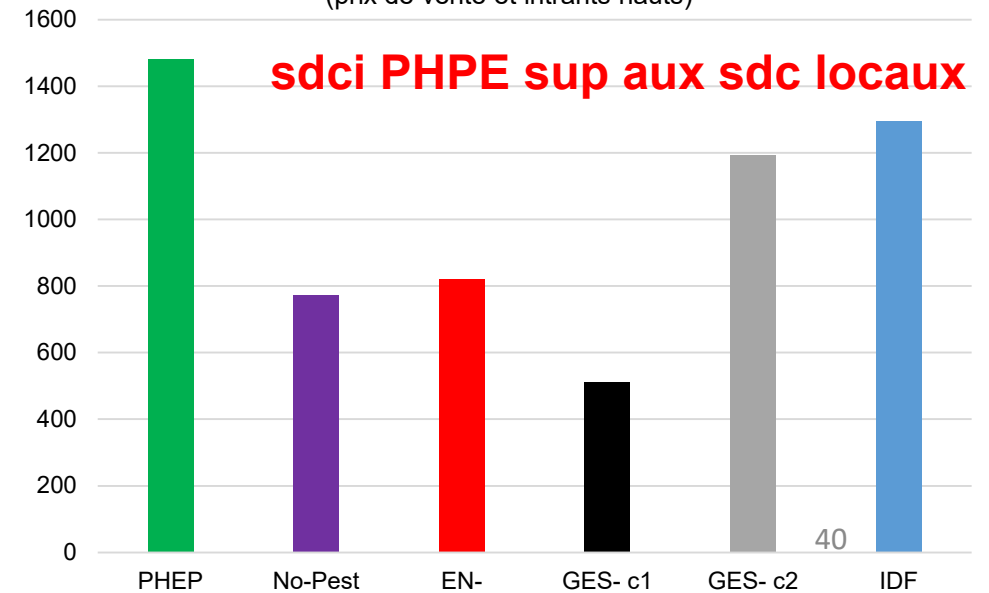
S1: Prix représentatifs période 2012-2016



S2: Prix de vente représentatifs période 2012-2016, et prix du fuel et N de 2022 (hauts)



S3: Prix représentatifs de 2022 (prix de vente et intrants hauts)



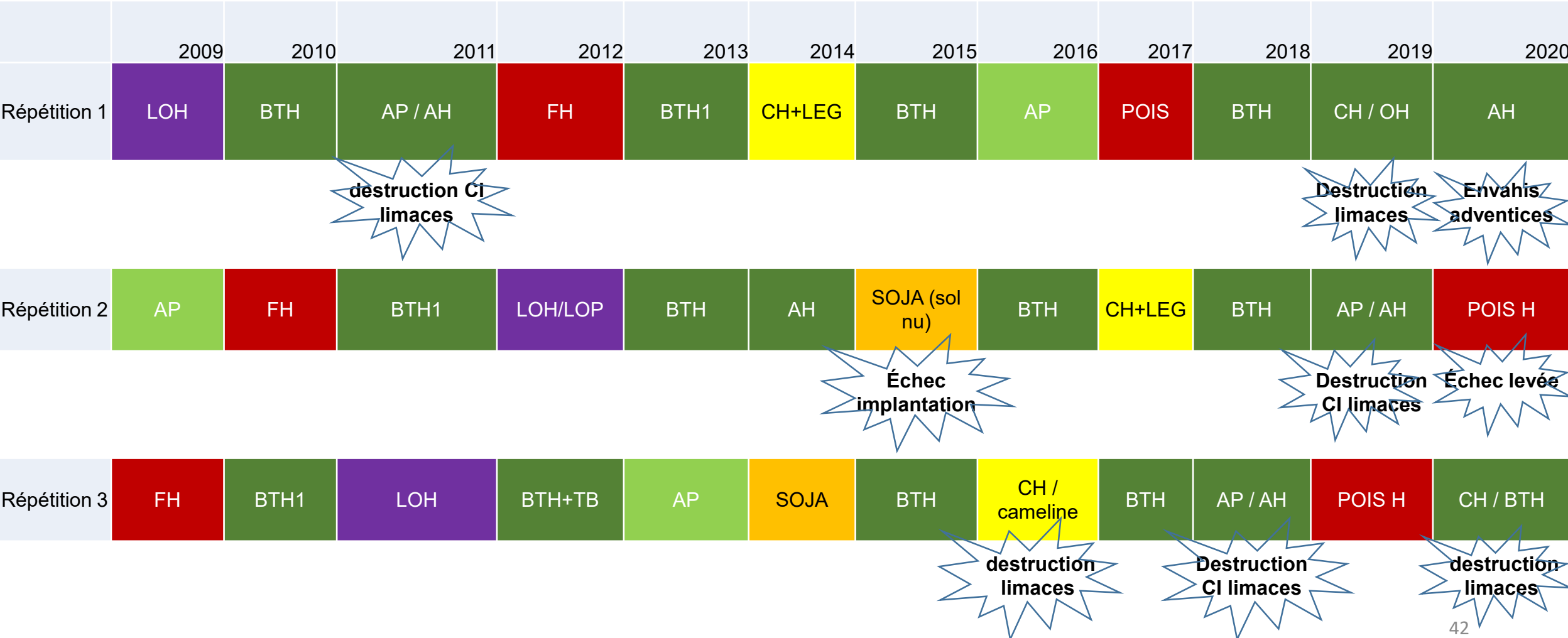
Compromis entre performances

Réduction drastique de la consommation d'énergie fossile → **Réduction des objectifs de production** pour les espèces fertilisées, dès l'étape de la conception.

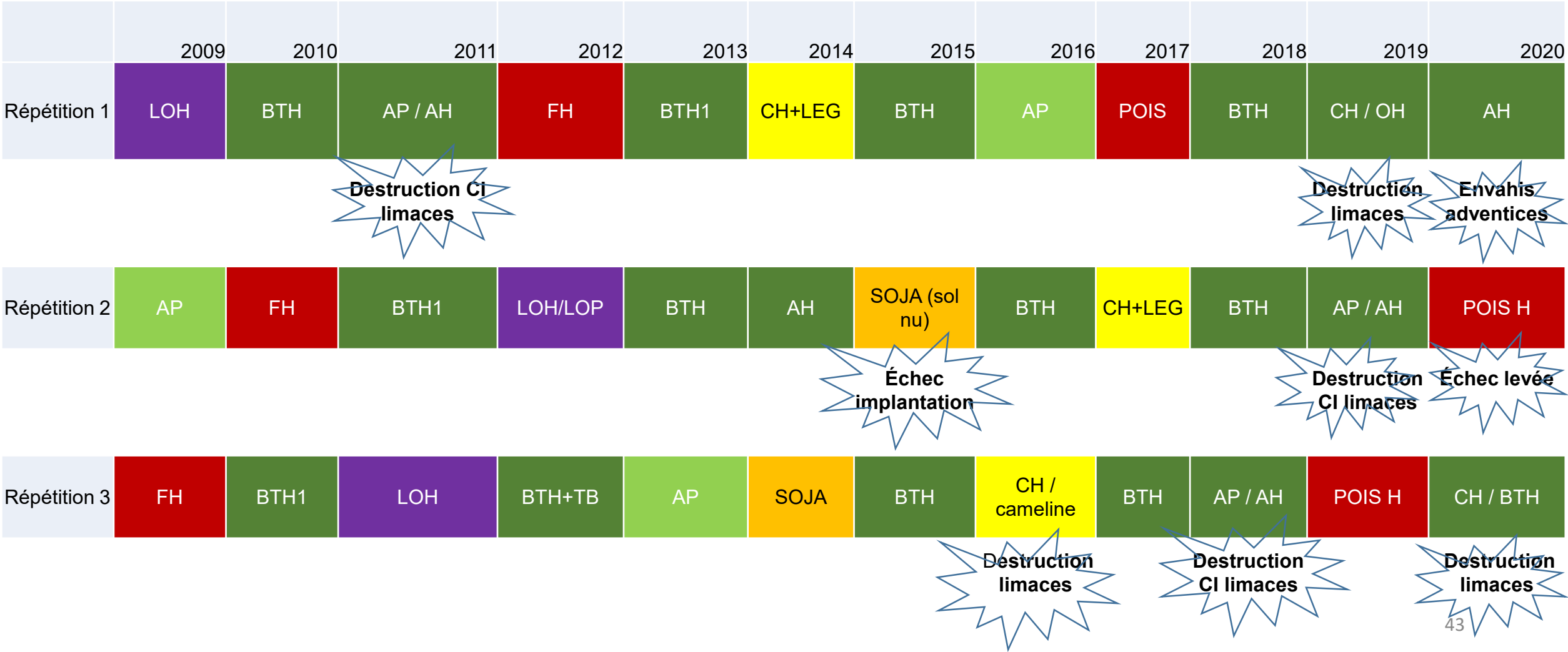
Dans nos conditions expérimentales, en lien avec les choix des leviers techniques (ici le non travail du sol) :

- **difficultés de maîtriser les populations d'adventices** (dans la culture de lin) → **+++ herbicides**
- **difficultés de maîtriser les populations « destructrices » des peuplements végétaux** (limaces et autres), induisant :
 - (i) → **+++ de molluscicides** (2015),
 - (ii) → **échecs d'implantation de certaines espèces** (plantes oléagineuses: moutarde limitant l'implantation d'espèces de printemps, le colza) d'où **baisse de la diversité des espèces implantées**

→ **Des échecs de plus en plus nombreux dans le temps**



→ **Diminution de la diversité des espèces implantées**
moins d'espèces de printemps (car échec des CI),
échec des colzas et plus de céréales d'hiver



Performances des autres sdci par rapport aux sdc locaux

- **Bonnes performances énergétiques par rapport aux sdc locaux, sans dérives environnementales**, en termes de maîtrise d'adventices (excepté GES-C1), de limaces et de la diversité des espèces

% / sdc locaux	PHPE	No-Pest	GES- C1	GES- C2	EN-
Consommation d'énergie totale	62%	60%	56%	66%	41%
Consommation d'énergie directe	87%	98%	48%	76%	48%
Consommation d'énergie indirecte	50%	40%	61%	61%	38%

- **Réductions des émissions de GES**
- **Diminutions de l'utilisation de pesticides**
- **Performances économiques variables par rapport aux sdc locaux** (cf. scénarii économiques)

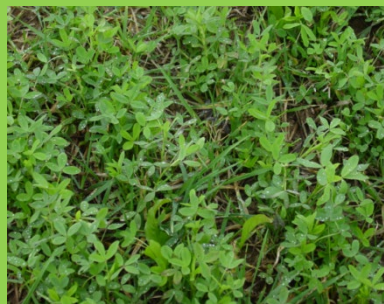
Les limites de cette étude

- Les conditions spécifiques du pédoclimat du plateau de Grignon
- Apprentissages des techniques du non travail du sol pour satisfaire la contrainte énergétique
- Paramétrage « moyennement » précis pour le calcul des performances
 - (i) coût énergétique des récoltes
 - (ii) coût énergétique de certains pesticides et fertilisants
- Non prise en compte de la consommation d'énergie pour le séchage des grains de maïs des sdc locaux
- Dépendance des coûts au système expérimental
- Conditions d'humidité du sol induisant des consommations variées d'énergie fossile directe non prise en compte
- Données incomplètes du sdc GES- C2 suite à l'arrêt de l'expérimentation en 2019

Conclusions

- Les leviers techniques consommateurs d'énergie fossile ont été identifiés
- Réduire la consommation d'énergie fossile à l'échelle du système de culture s'accompagne de compromis entre performances
- Mettre en œuvre une nouvelle combinaison de leviers techniques conduit à des apprentissages
- Performances économiques de systèmes de culture peu consommateur d'énergie sont très dépendants des scénarii économiques

« Grand objectif scientifique »
 Evaluation, conception et pilotage de systèmes agroécologiques
 Sobriété énergétique en agriculture



Renewable Agriculture and Food Systems: 30(6); 487-502 doi:10.1017/S1742170514000313

Designing innovative productive cropping systems with quantified and ambitious environmental goals

Caroline Colnenne-David^{1*} and Thierry Doré²

¹INRA, UMR 211 Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France.
²AgroParisTech, UMR 211 Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France.
 *Corresponding author: caroline.colnenne@grignon.inra.fr

Data in Brief 38 (2021) 107303

Contents lists available at ScienceDirect

Data in Brief

ELSEVIER journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib

Data Article

Nitrous oxide fluxes and soil nitrogen contents over eight years in four cropping systems designed to meet both environmental and production goals: A French field nitrogen data set

Caroline Colnenne-David¹, Gilles Grandeau, Marie-Hélène Jeuffroy, Thierry Doré

Université Paris-Saclay, Inrae, AgroParisTech, Agronomie, Thiverval-Grignon 78850, France

Problématiques & Débats

Concilier performances environnementales et rendements élevés : premières évaluations de systèmes de culture innovants sous contraintes

Caroline Colnenne-David¹, Gilles Grandeau², Thierry Doré³



Merci pour votre attention

Field Crops Research 210 (2017) 114-128

Contents lists available at ScienceDirect

Field Crops Research

ELSEVIER journal homepage: www.elsevier.com/locate/fcr

Ambitious environmental and economic goals for the future of agriculture are unequally achieved by innovative cropping systems

Caroline Colnenne-David^{1*}, Gilles Grandeau², Marie-Hélène Jeuffroy³, Thierry Doré⁴

caroline.colnenne-david@inrae.fr



Séminaire 24 mai 2022