

Bouquets de services fournis par les cultures intermédiaires :

état des connaissances et pistes pour la sélection

26 mars 2019



Lionel Alletto

Chambre régionale d'agriculture Occitanie

Chercheur associé INRA UMR Agroécologies, Innovations, Territoires

lionel.alletto@occitanie.chambagri.fr

Antoine Couëdel – Hélène Tribouillois (INRA UMR AGIR)

Éric Justes (CIRAD UMR SYSTEM)

**AGRICULTURES
& TERRITOIRES**
CHAMBRE D'AGRICULTURE
OCCITANIE



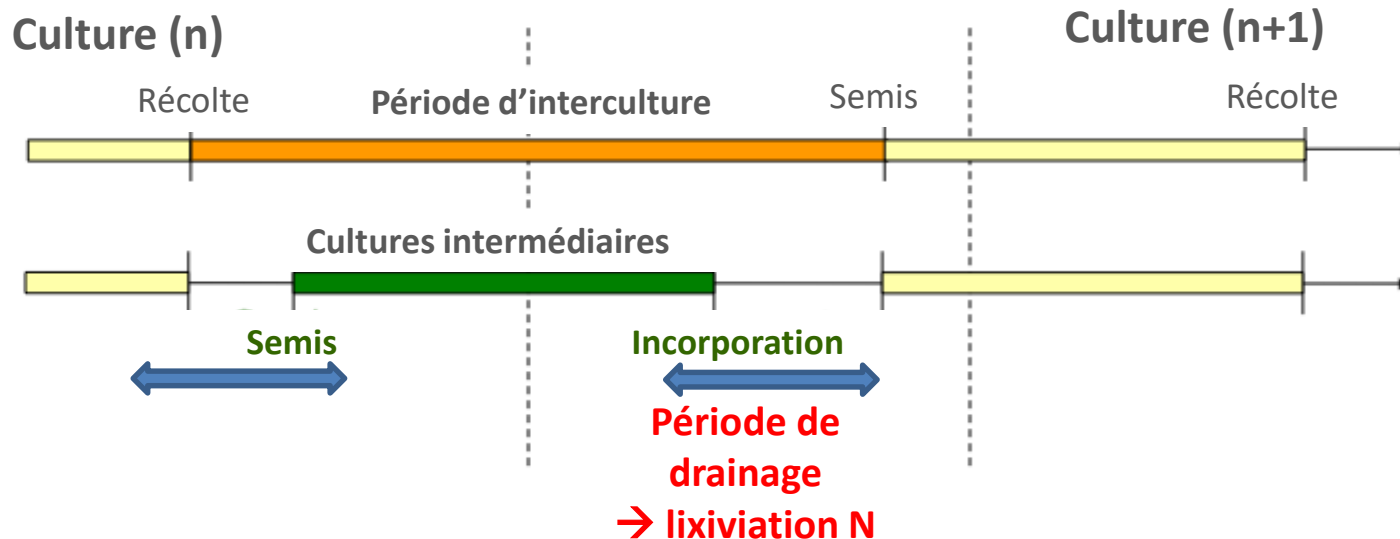
INRA
SCIENCE & IMPACT

Définition

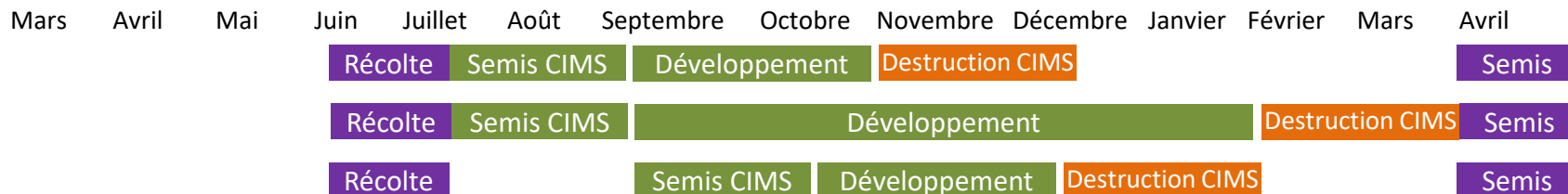


Période d'interculture : période entre deux cultures marchandes
▶ 1 semaine à 9 mois

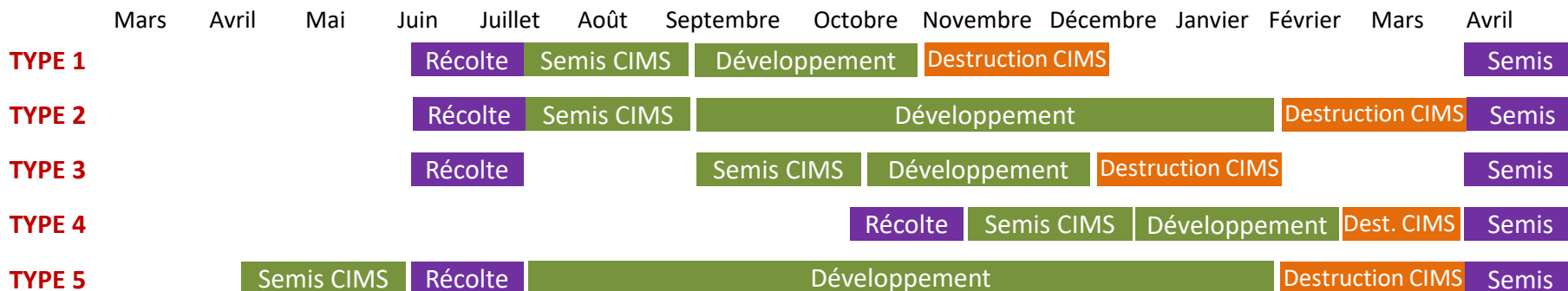
Succession de cultures



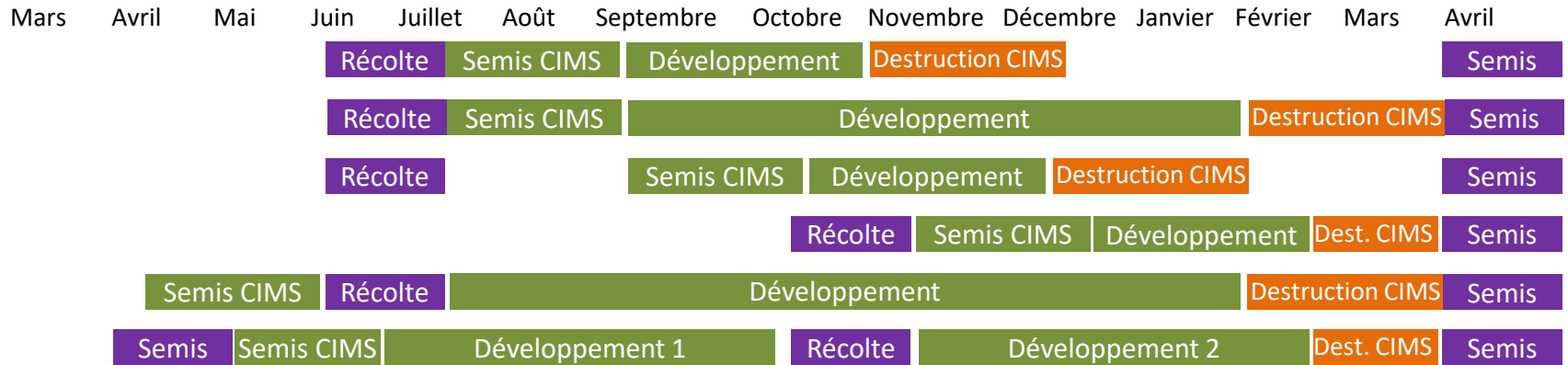
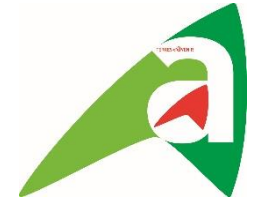
≠ périodes d'implantation et destruction



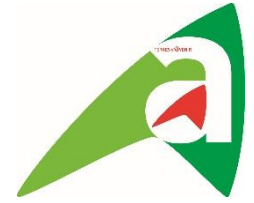
≠ périodes d'implantation et destruction



≠ périodes d'implantation et destruction



≠ périodes d'implantation



- ▶ Phase de semis – germination – levée souvent critique :
 - (i) conditions de semis pas toujours optimales : à la volée, dans un mulch
 - (ii) conditions hydriques / thermiques extrêmes (?)

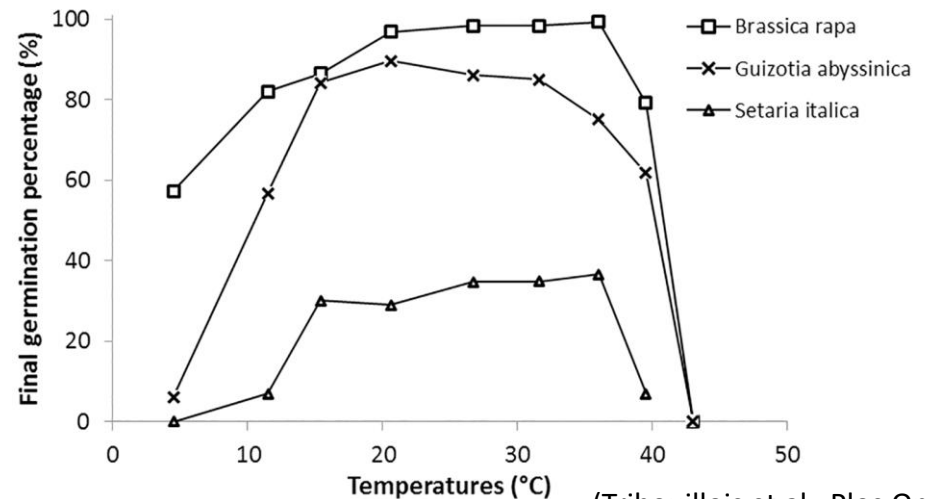
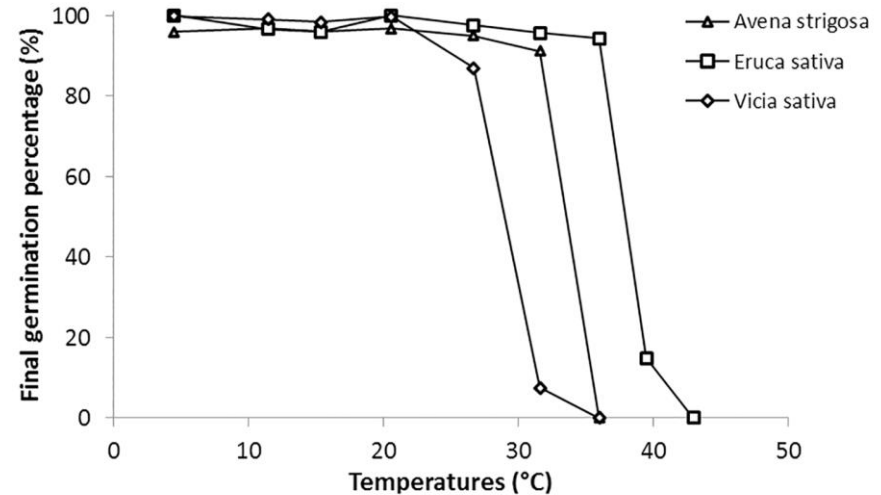
Conditions de germination des CIMS



→ Résultats issus des travaux d'Hélène Tribouillois

(INRA UMR AGIR, Toulouse)

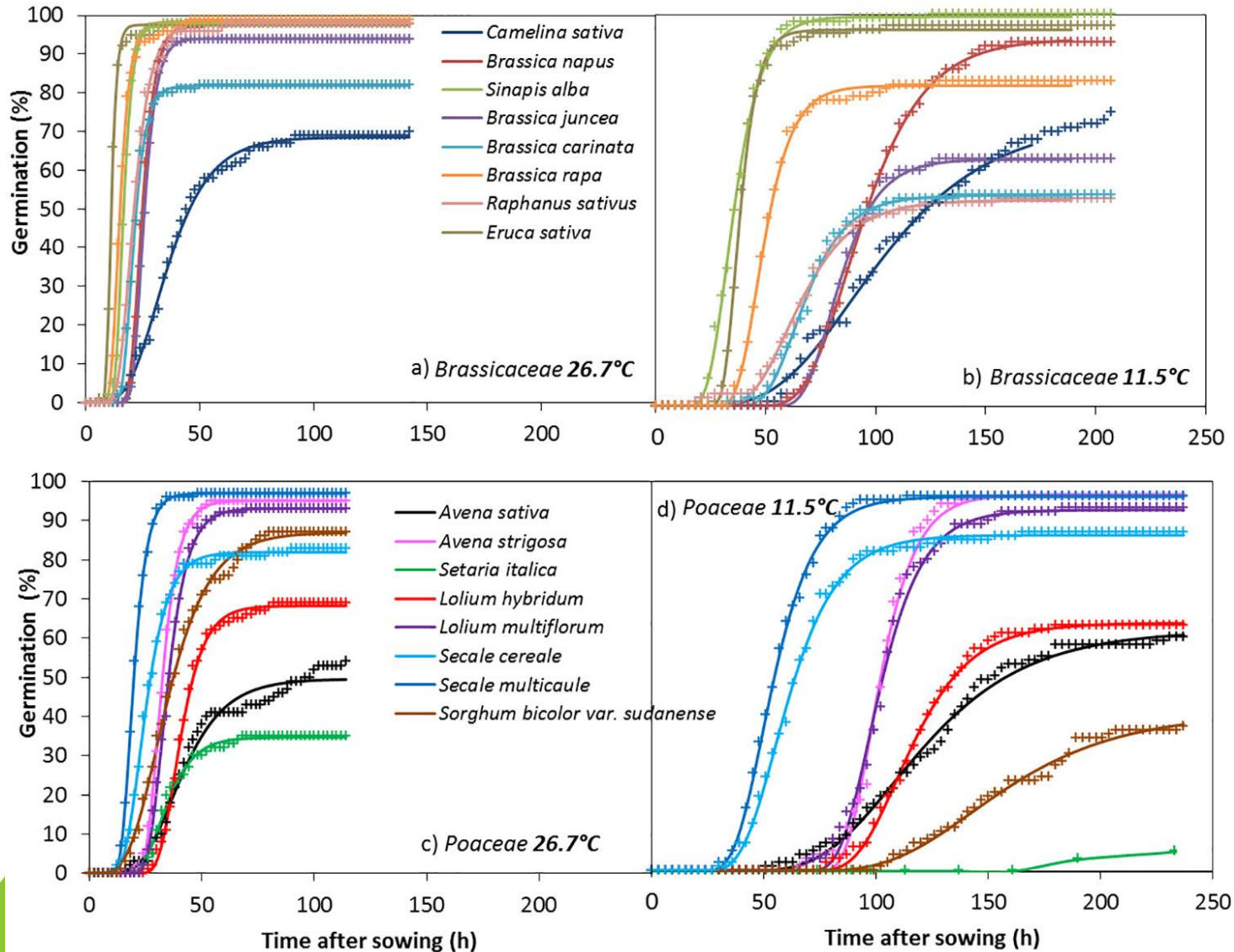
→ Des réponses de la germination à la température très différentes selon les espèces



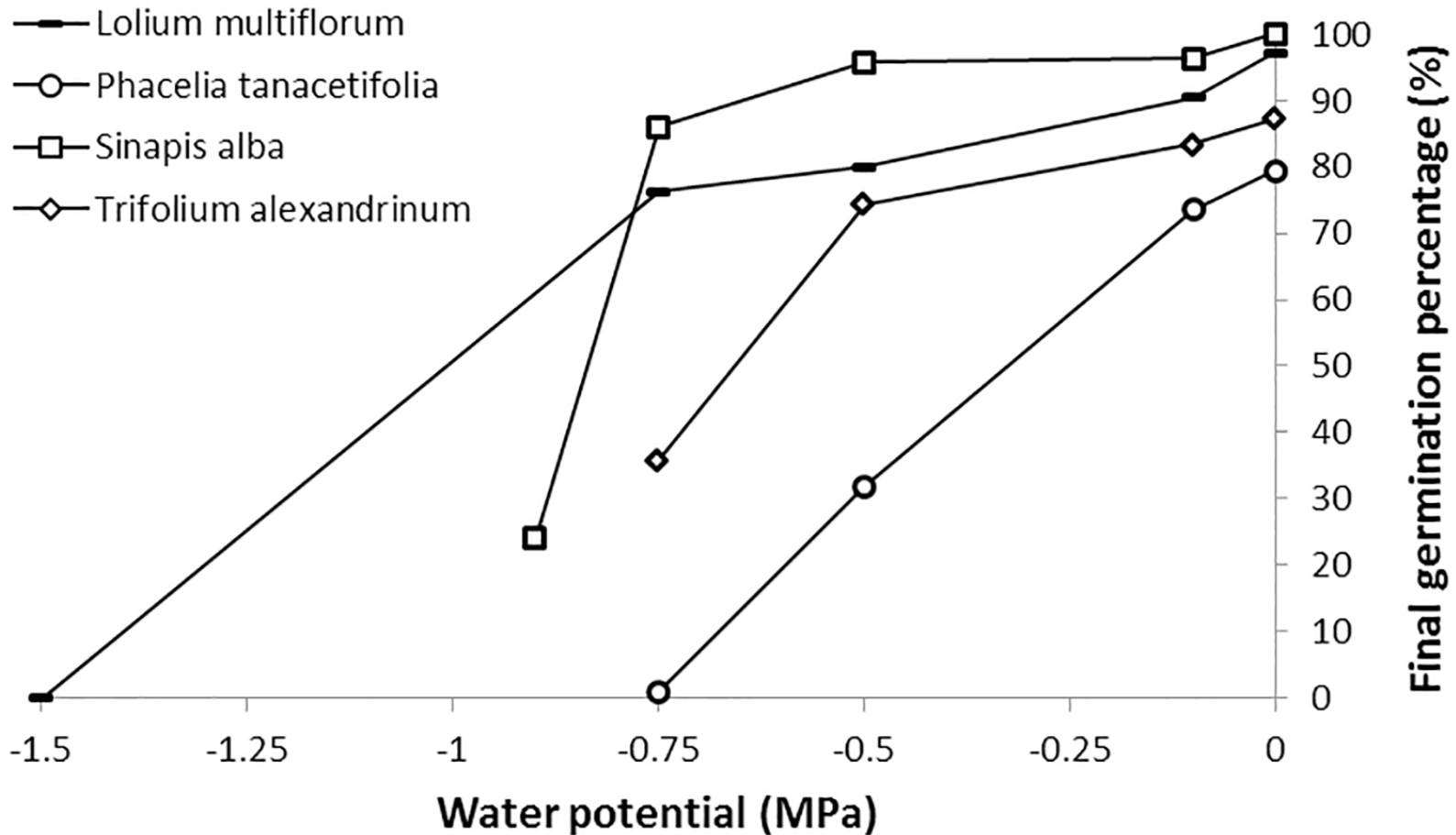
(Tribouillois et al., Plos One, 2016)

Family	Species	Id.	Seed weight (mg)	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Optimum temperature (°C)	Base temperature (°C)
Asteraceae	<i>Guizotia abyssinica</i>	GA	3.3	8.7 ± 2.8	42.9 ± 0.3	28.7 ± 1.3	8.1 ± 0.9
	<i>Helianthus annuus</i>	HA	48.0	2.3 ± 1.1	36.0 ± 0.0	32.5 ± 0.6	4.4 ± 0.5
		Mean	25.7 ± 31.6	5.5 ± 4.5	39.5 ± 4.9	30.6 ± 2.7	6.3 ± 2.6
Brassicaceae	<i>Brassica carinata</i>	BC	5.0	0.0 ± 0.0	37.1 ± 0.2	32.3 ± 0.3	6.7 ± 0.9
	<i>Brassica juncea</i>	BJ	3.0	0.3 ± 0.6	37.8 ± 1.4	33.7 ± 0.6	6.8 ± 0.5
	<i>Brassica napus</i>	BN	2.7	0.0 ± 0.0	38.9 ± 0.5	32.7 ± 0.4	7.2 ± 0.2
	<i>Brassica rapa</i>	BR	3.7	0.0 ± 0.0	39.7 ± 0.0	33.1 ± 0.5	6.6 ± 0.0
	<i>Camelina sativa</i>	CS	1.3	0.0 ± 0.0	35.8 ± 0.4	28.3 ± 0.1	2.1 ± 0.1
	<i>Eruca sativa</i>	ES	1.3	0.8 ± 0.6	36.2 ± 0.1	32.5 ± 0.4	5.4 ± 0.1
	<i>Raphanus sativus</i>	RS	13.0	1.2 ± 0.9	39.5 ± 0.0	37.2 ± 0.2	7.3 ± 0.6
	<i>Sinapis alba</i>	SA	8.0	0.0 ± 0.0	40.4 ± 0.3	29.6 ± 0.7	1.2 ± 0.1
		Mean	4.8 ± 4.0	0.3 ± 0.5	38.2 ± 1.7	32.4 ± 2.7	5.4 ± 2.4
	Fabaceae	<i>Lathyrus sativus</i>	LS	176.0	0.3 ± 0.6	39.1 ± 0.6	26.8 ± 0.7
<i>Lens nigricans</i>		LN	21.5	0.3 ± 0.5	37.4 ± 1.4	31.8 ± 2.2	0.8 ± 1.4
<i>Lupinus angustifolius</i>		LA	179.4	1.3 ± 0.8	35.4 ± 4.2	25.7 ± 3.7	0.8 ± 0.1
<i>Medicago lupulina</i>		ML	1.5	2.1 ± 0.5	30.3 ± 4.8	26.2 ± 4.1	0.6 ± 0.4
<i>Melilotus officinalis</i>		MO	2.5	1.1 ± 1.1	33.5 ± 1.3	24.9 ± 2.3	0.8 ± 1.3
<i>Onobrychis viciifolia</i>		OV	23.0	1.8 ± 1.1	31.7 ± 0.2	24.2 ± 1.2	0.0 ± 0.0
<i>Pisum sativum ASSAS</i>		PSA	168.8	0.7 ± 0.7	33.5 ± 3.2	28.5 ± 0.9	1.1 ± 1.5
<i>Pisum sativum PFX</i>		PSP	214.5	0.0 ± 0.0	32.0 ± 0.6	29.3 ± 1.3	7.3 ± 0.8
<i>Trifolium alexandrinum</i>		TA	3.0	1.1 ± 1.9	41.6 ± 1.2	30.0 ± 1.4	6.1 ± 0.3
<i>Trifolium incarnatum</i>		TI	4.7	1.5 ± 1.2	43.4 ± 0.5	26.5 ± 1.9	6.4 ± 0.3
<i>Trigonella foenum-graecum</i>		TFG	16.0	0.0 ± 0.0	43.0 ± 0.0	30.1 ± 0.3	4.2 ± 1.0
<i>Vicia benghalensis</i>		VB	41.4	2.6 ± 0.5	39.5 ± 0.0	23.6 ± 0.8	2.1 ± 0.1
<i>Vicia faba LAURA</i>		VFL	442.8	0.2 ± 0.4	33.9 ± 2.7	23.8 ± 2.6	0.0 ± 0.0
<i>Vicia faba SSNS</i>	VFS	359.6	0.5 ± 0.5	31.6 ± 0.0	28.1 ± 0.3	1.2 ± 2.0	
<i>Vicia sativa</i>	VS	53.8	0.6 ± 1.0	30.0 ± 1.7	22.0 ± 0.8	4.1 ± 0.0	
<i>Vicia villosa</i>	VV	26.7	0.5 ± 0.8	33.1 ± 6.8	20.2 ± 1.1	1.4 ± 0.9	
	Mean	108.5 ± 137.0	0.9 ± 0.8	35.6 ± 4.5	26.4 ± 3.2	2.5 ± 2.4	

Conditions de germination des CIMS



Conditions de germination des CIMS

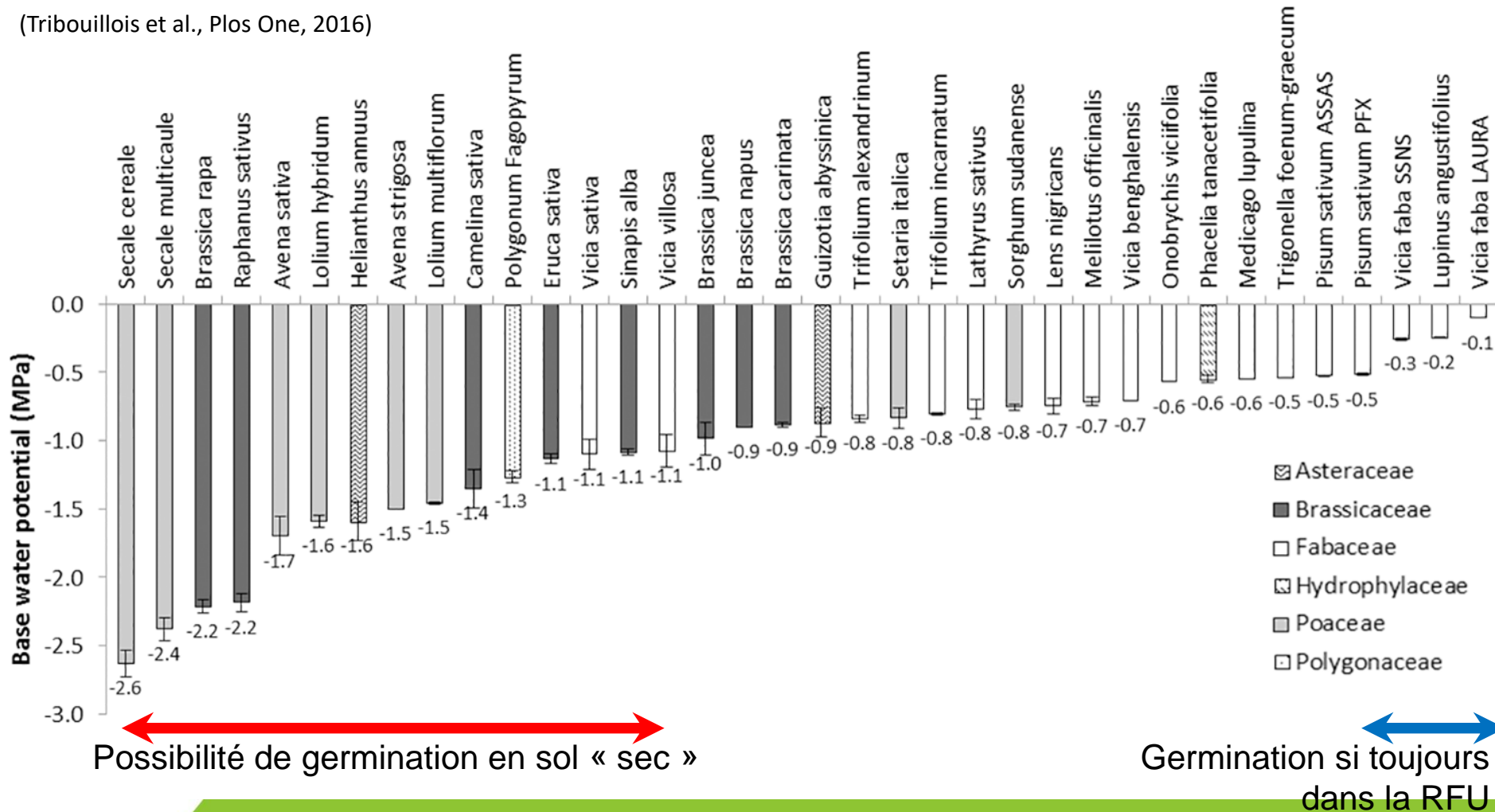


(Tribouillois et al., Plos One, 2016)

Conditions de germination des CIMS



(Tribouillois et al., Plos One, 2016)



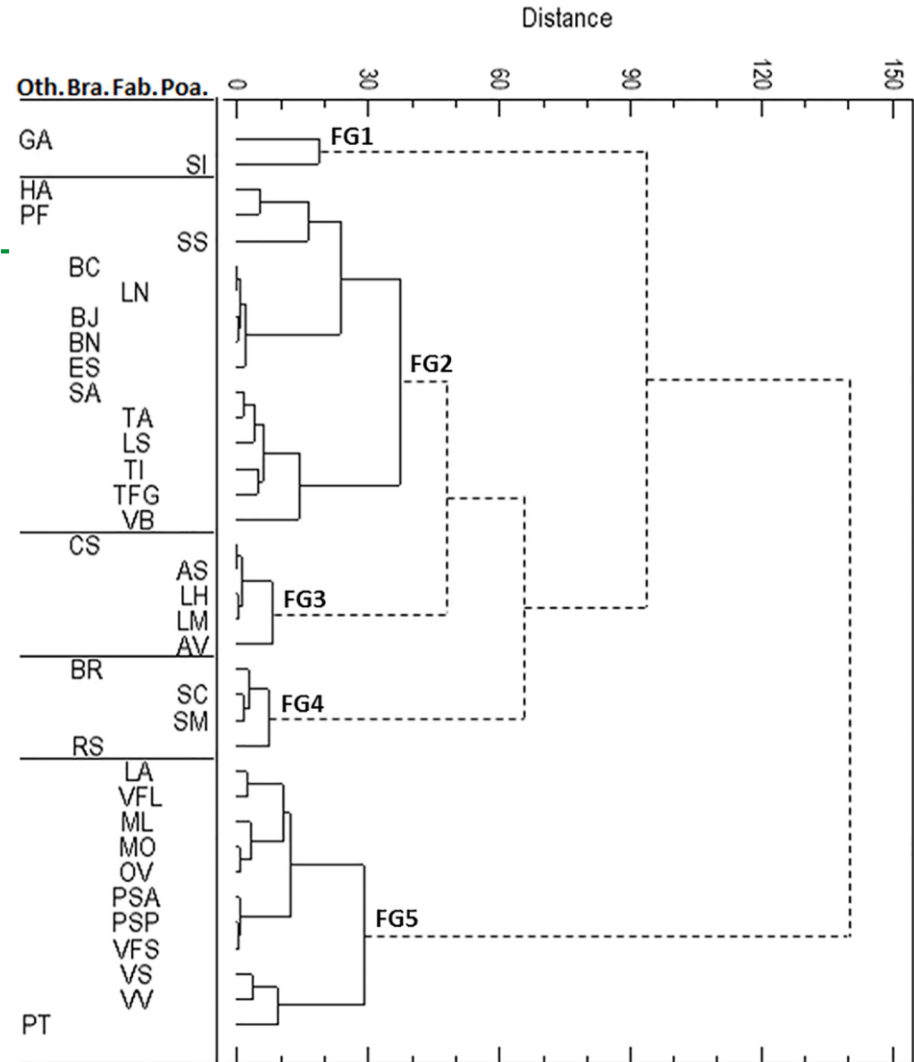
FG1 : T°C élevée & bonne tolérance au stress hydrique: Nyger ; Moha

FG2 : T°C moyenne à élevée & bonne tolérance au stress hydrique: Tournesol ; Sarrasin ; Mout. Eth. ; Mout. Brune ; Colza ; Roquette ; Mout. Blanche ; Lentille ; Trèfle Alex. ; Gesse ; Trèfle Inc. ; Fenugrec ; Vesce pourpre

FG3 : T°C faible à moyenne & bonne tolérance au stress hydrique: Cameline ; Avoine diploïde et tétraploïde ; Ray-grass hybride et italien

FG4 : T°C faible à élevée & très bonne tolérance au stress hydrique: Navette ; Radis fourrager ; Seigle ; Seigle multicaule

FG5 : T°C faible à modérée & tolérance moyenne au stress hydrique: Phacélie ; Lupin bleu ; Féverole ; Luzerne lupuline ; Mélilot ; Sainfoin ; Pois fourrager ; Vesce commune ; Vesce velue



(Tribouillois et al., Plos One, 2016)

Table 2. Mean (± 1 standard deviation) cardinal temperatures and base water potential of the species in each functional group defined from hierarchical classification.

Functional group	Minimal temperature	Optimal temperature	Maximal temperature	Base water potential
1	10.0 \pm 1.8 b	32.4 \pm 5.2 bc	41.2 \pm 2.4 c	-0.9 \pm 0.1 c
2	1.3 \pm 1.6 a	30.7 \pm 3.2 b	39.3 \pm 2.3 c	-0.9 \pm 0.3 c
3	0.4 \pm 0.4 a	28.1 \pm 1.7 ab	35.0 \pm 1.4 b	-1.5 \pm 0.1 b
4	0.4 \pm 0.6 a	34.2 \pm 2.2 c	38.6 \pm 1.2 c	-2.4 \pm 0.2 a
5	0.8 \pm 0.7 a	24.9 \pm 3.0 a	32.1 \pm 2.2 a	-0.6 \pm 0.3 c

Letters 'a', 'b', 'c' indicate significantly ($P < 0.05$) different means.

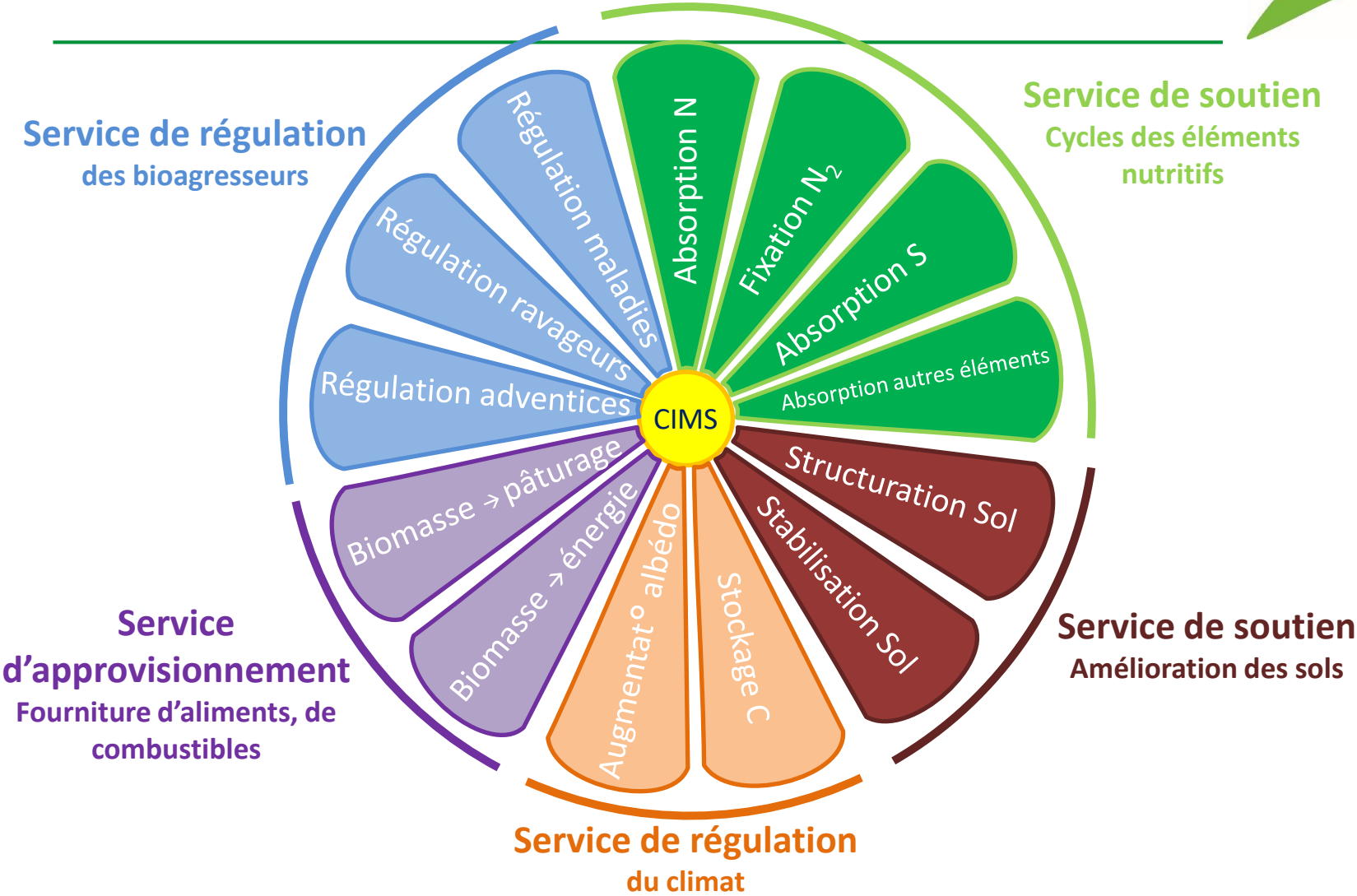
Pistes pour la sélection (1)



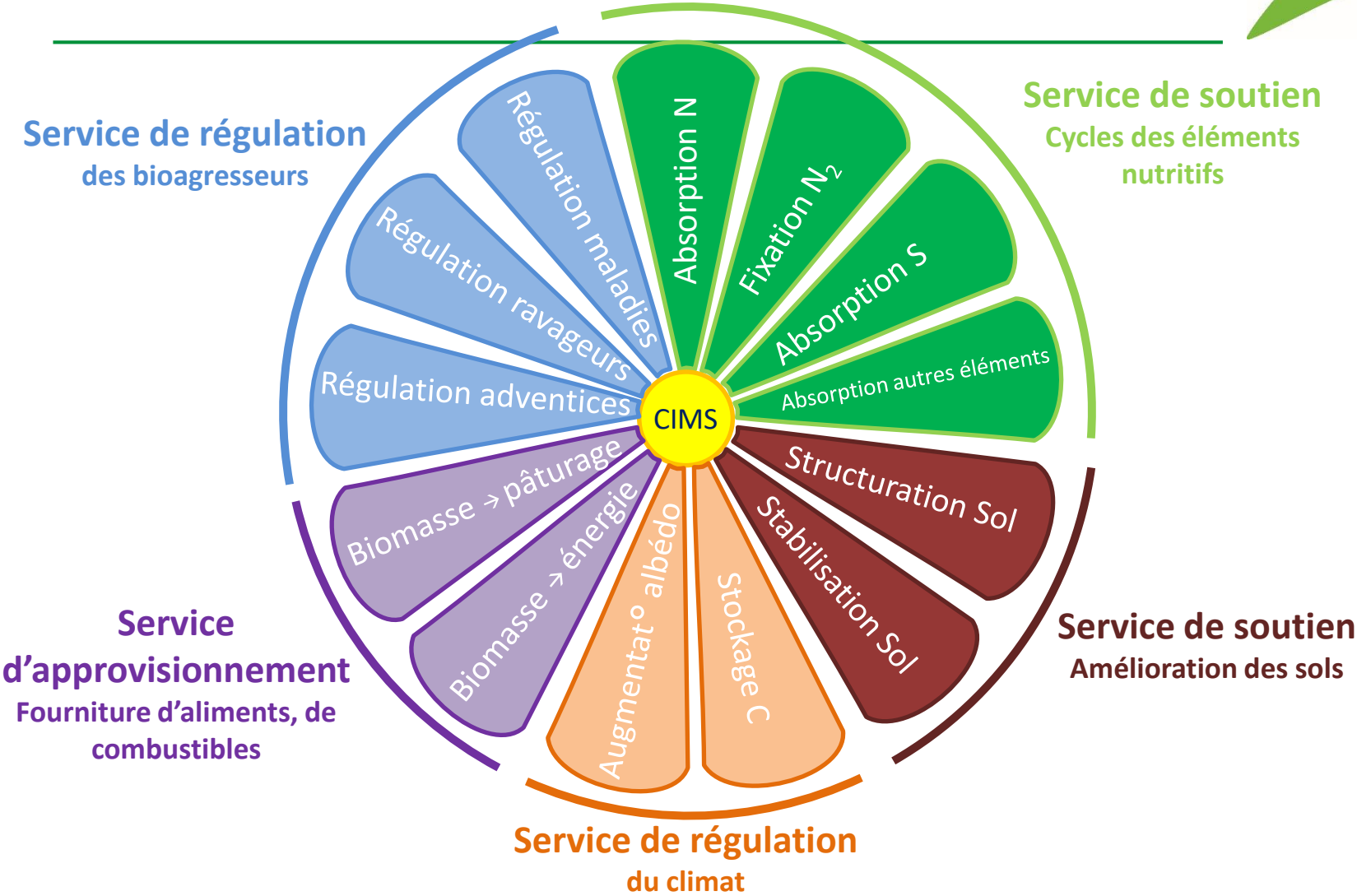
- ▶ Fournir des informations par espèce / variété sur les conditions de germination = aide au choix des espèces f(Type, pédoclimat)

- ▶ Sélectionner des espèces et variétés susceptibles de germer et lever en conditions difficiles
= enjeu important pour le Sud France / adaptation au CC

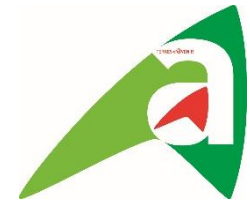
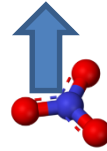
Bouquets de services attendus des CIMS



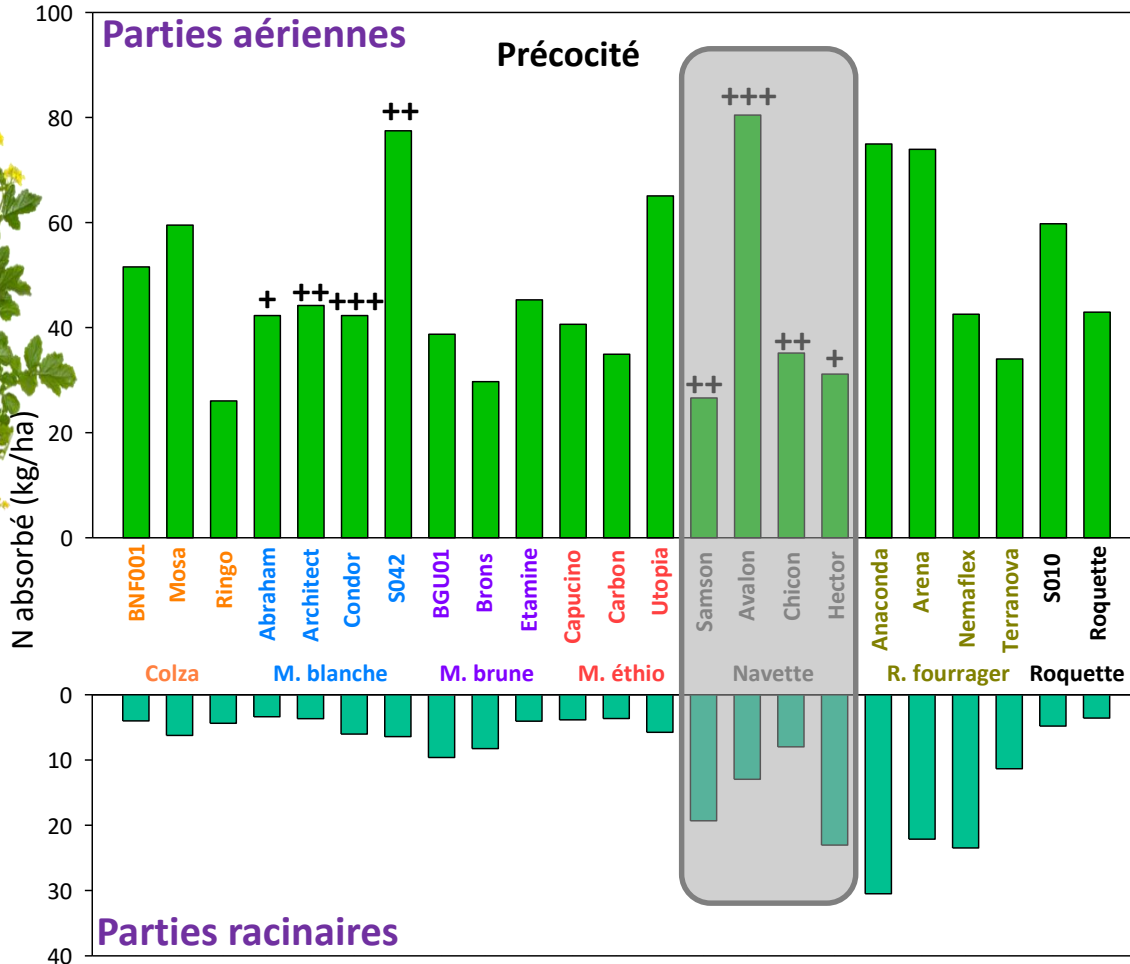
Bouquets de services attendus des CIMS



Absorption d’N du sol



Semis : mi-août Destruction : déb. novembre



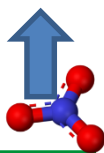
► Variabilité entre espèces

► Effet variétal => lien avec la précocité des variétés ?
Pas toujours très clair...

► Localisation différente de l’N avec effet variétal pour certaines espèces (ex. navette)

(Couëdel et al., AGEE, 2018)

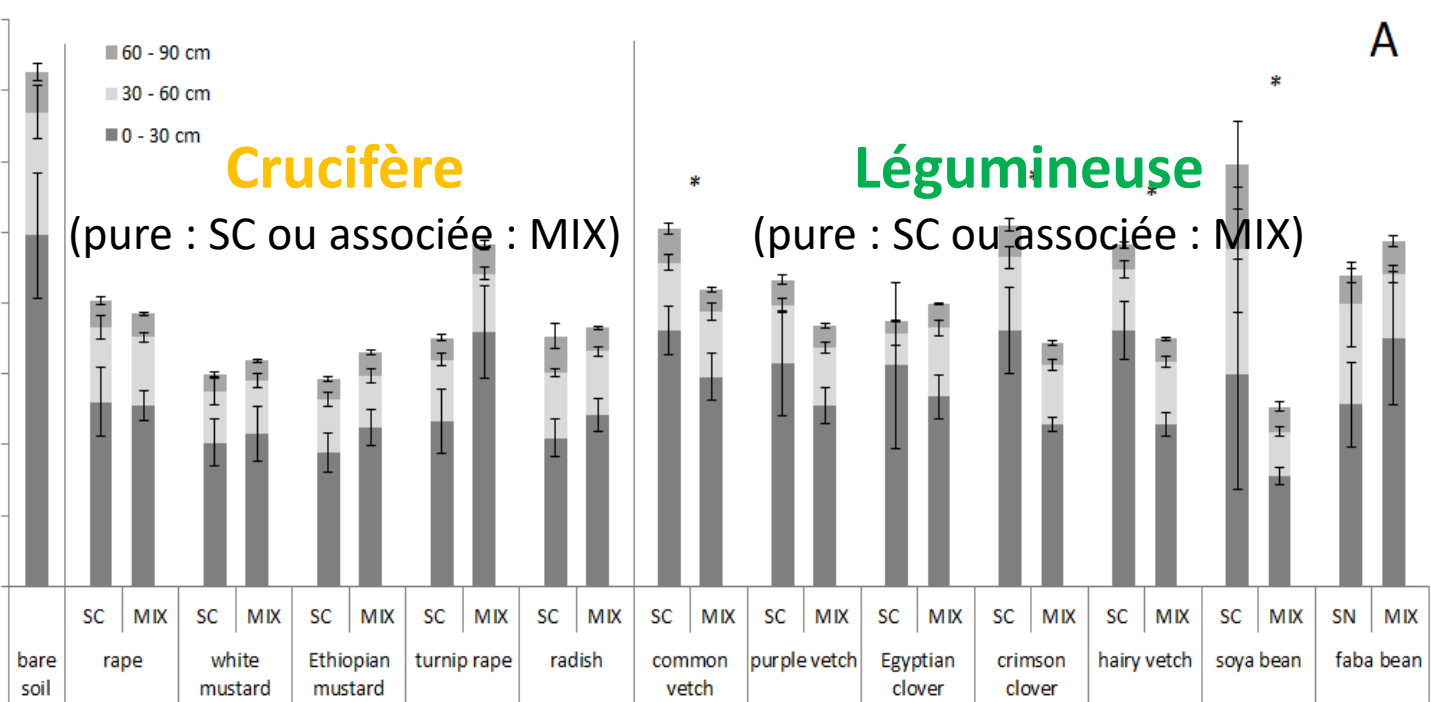
Toulouse 2014



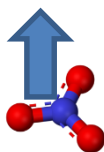
Soil mineral nitrogen at cover crop termination (kg ha⁻¹)

Crucifère
(pure : SC ou associée : MIX)

Légumineuse
(pure : SC ou associée : MIX)



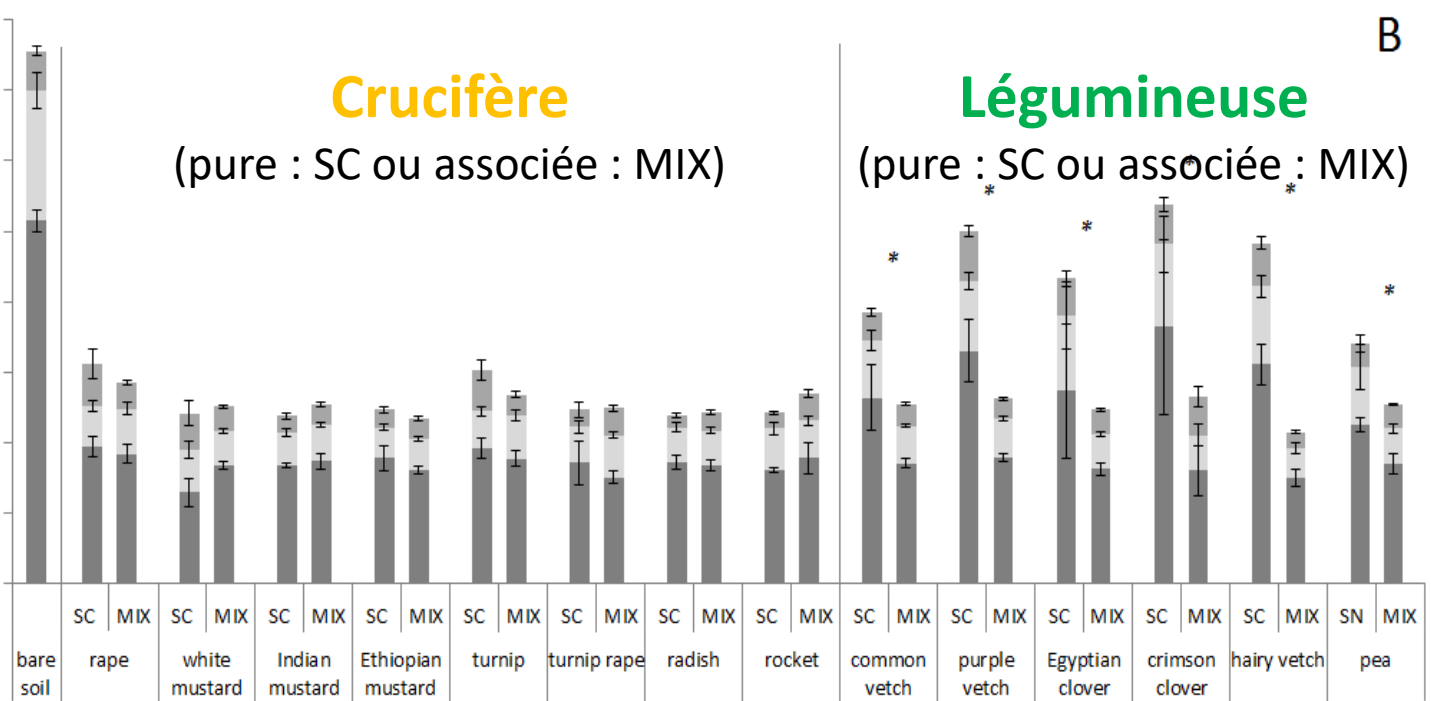
Toulouse 2015



Soil mineral nitrogen at cover crop termination (kg ha⁻¹)

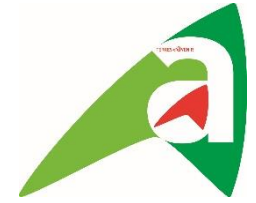
Crucifère
(pure : SC ou associée : MIX)

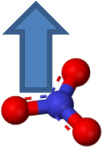
Légumineuse
(pure : SC ou associée : MIX)



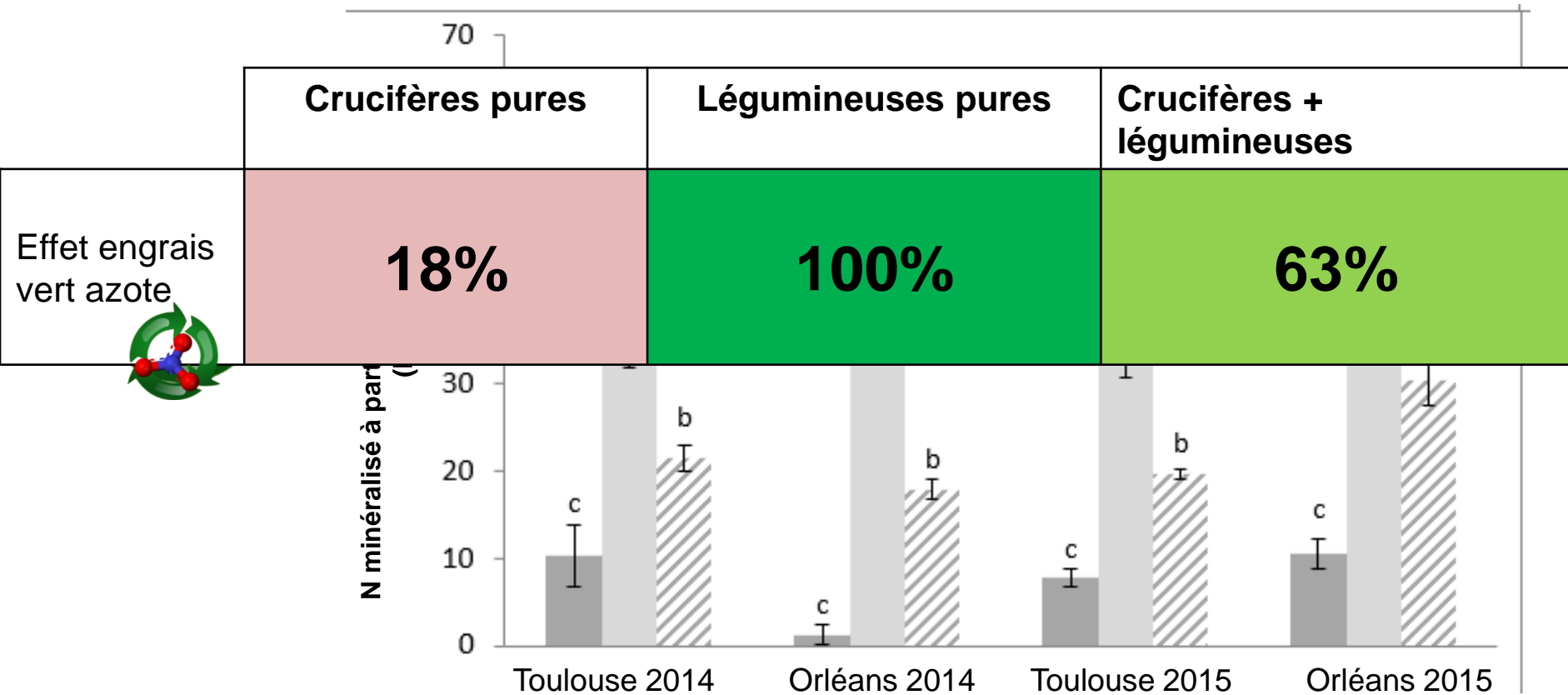
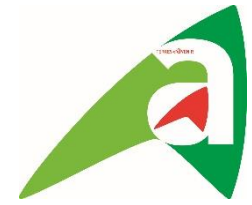
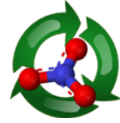
Cultu

Absorption d’N du sol



	Crucifères pures	Légumineuses pures	Crucifères + légumineuses
Piège à nitrate 	100%	66%	98%

Fourniture d’N



$$N_{\min} = N_{\text{acquis}} \times \%N_{\text{acquis}} \text{ minéralisé}$$

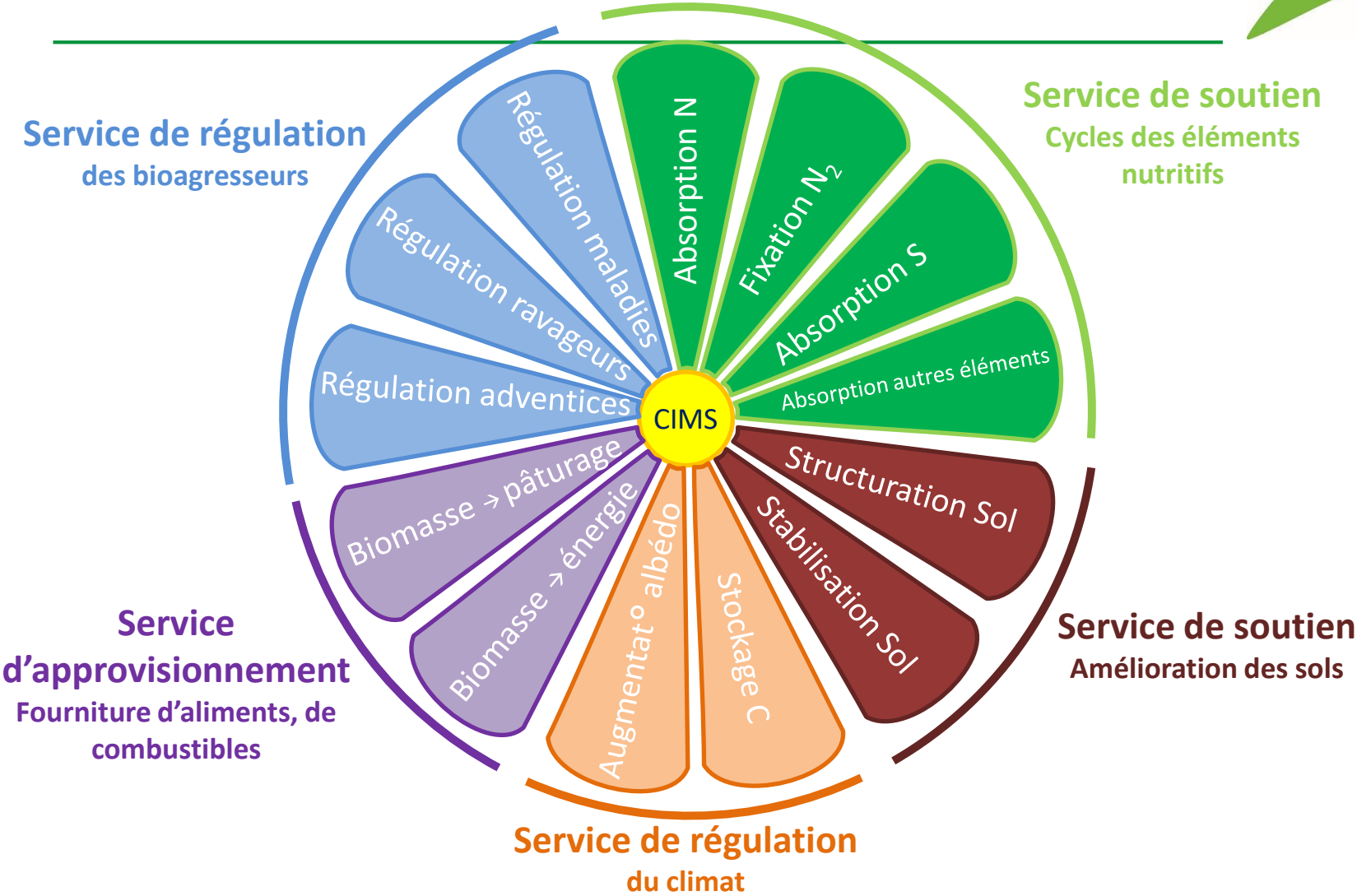
(Couëdel et al., AGEE, 2018)

$$N_{\text{acquis}} = \text{biomasse} \times N\%$$

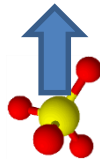
$$\% N_{\text{acquis}} \text{ minéralisé} = 0,72 - 2,657 \times C/N \text{ (Justes et al. 2009)}$$

Crucifères : C/N = [15;25] Légumineuses : C/N = [10;15]

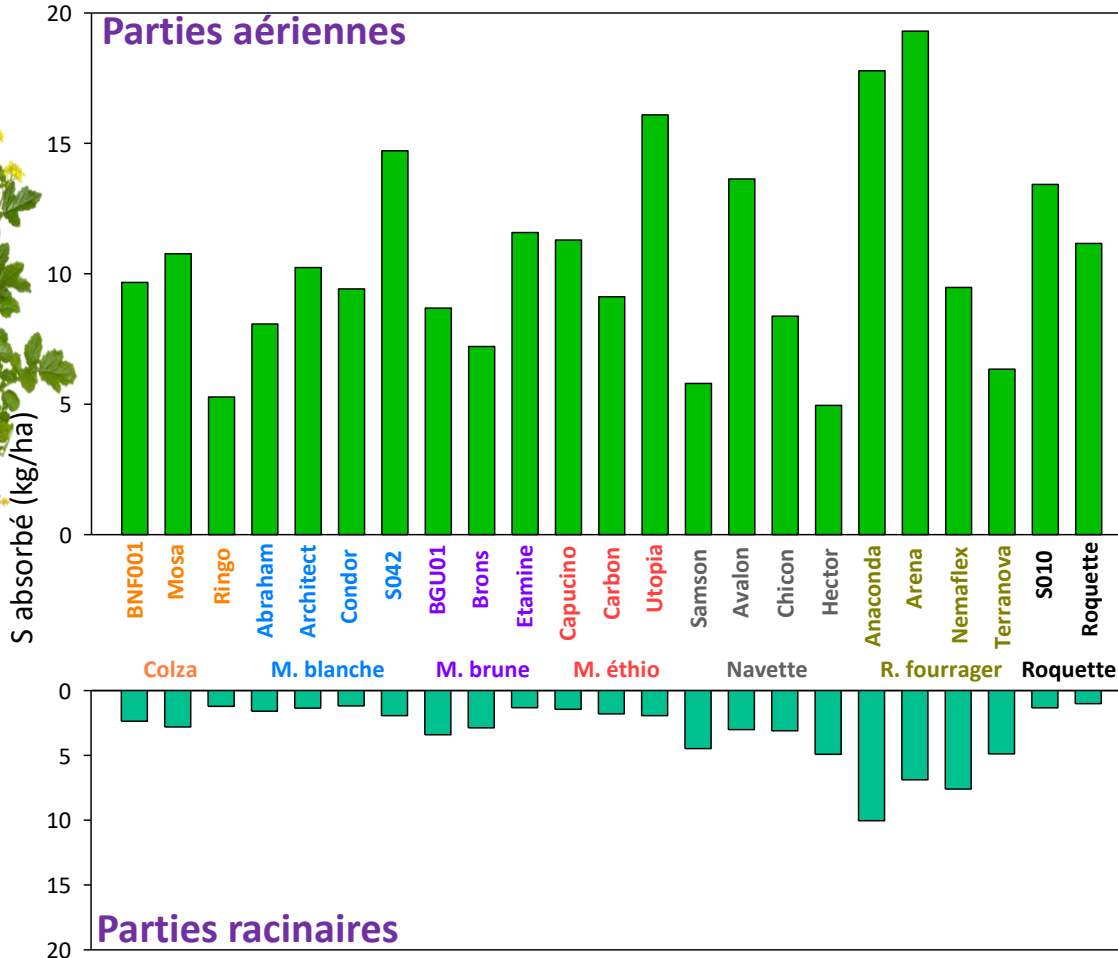
Bouquets de services attendus des CIMS



Absorption de S



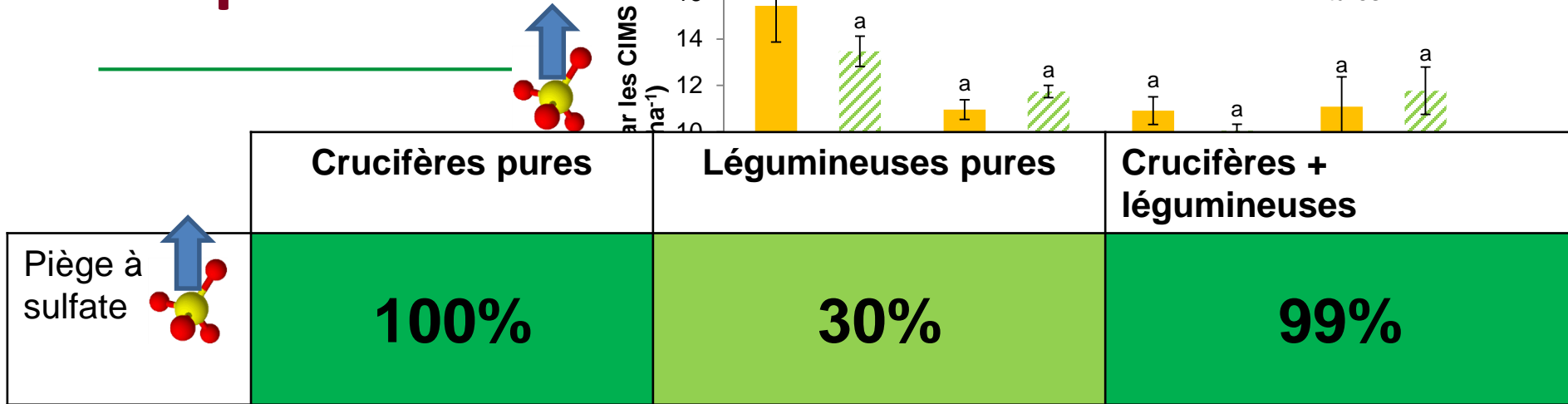
Semis : mi-août Destruction : déb. novembre



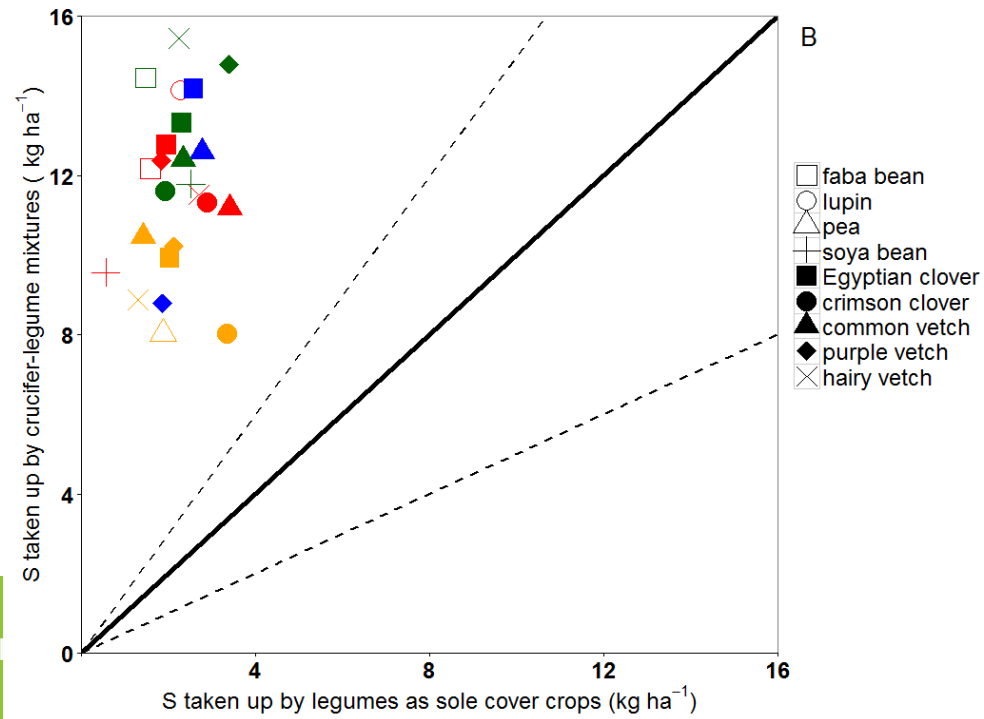
► Forte capacité d'absorption du S avec faible variabilité entre espèces, sauf radis fourrager

(Couëdel et al., Plant & Soil, 2018)

Absorption de S



(Couëdel et al., Plant & Soil, 2018)

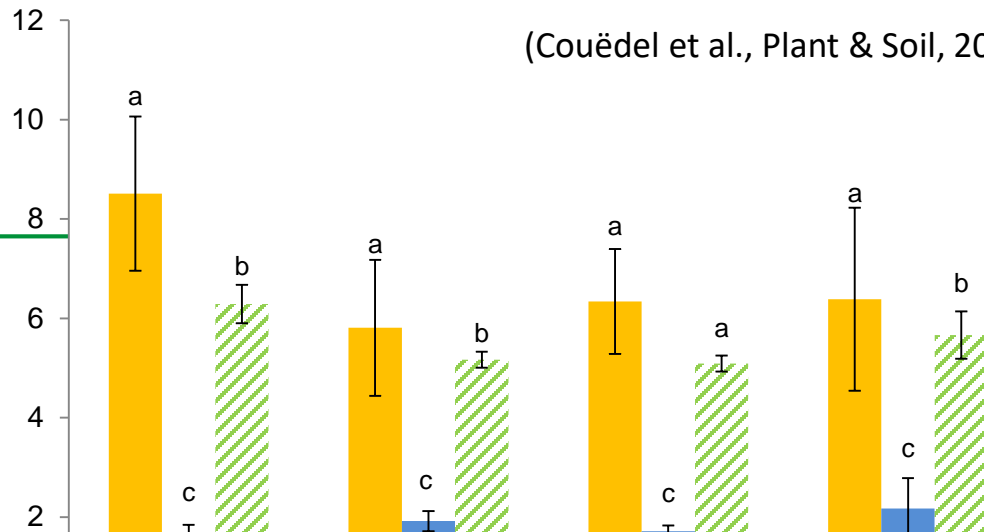


Fourniture de S



Minéralisé par les résidus de CIMS (kg ha⁻¹)

(Couëdel et al., Plant & Soil, 2018)



	Crucifères pures	Légumineuses pures	Crucifères + légumineuses
Effet engrais vert soufre	100%	23%	85%

Pas de différences entre espèces en mélanges

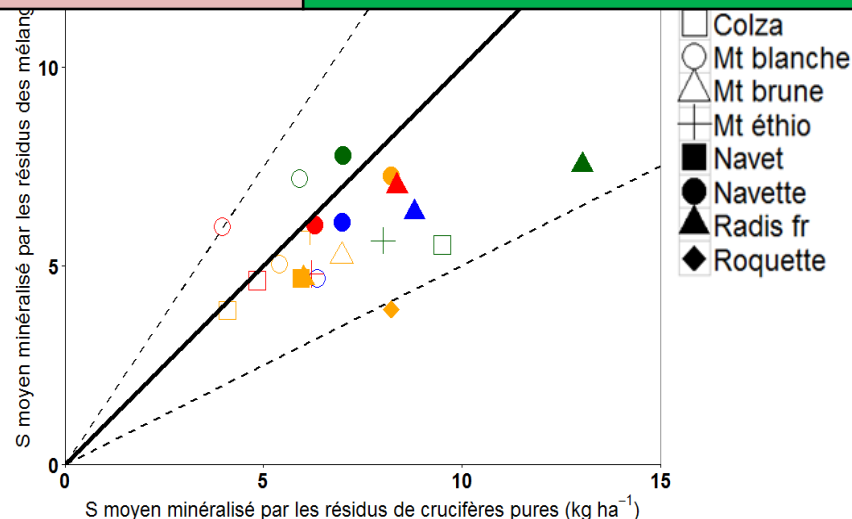


$$S_{\min} = S_{\text{acquis}} \times \%S_{\text{acquis}} \text{ minéralisé}$$

$$S_{\text{acquis}} = \text{biomasse} \times S\%$$

$$\% S_{\text{acquis}} \text{ minéralisé} = [70 - 0.16 \times C/S] / 1000 \text{ (Eriksen et al.)}$$

Crucifères : C/S = [50;150] Légumineuses : C/S = [15



Autres éléments...



Minéraux acquis en kg/ha	Crucifères	Légumineuses	Crucifères + légumineuses
Phosphore	7,3	6,9	8,8
Potassium	77	24	63
Calcium	63	30	56
Magnésium	10	9	12
Sodium	15	11	16
Bore	0,057	0,045	0,061
Cuivre	16	31	27
Fer	2	13	10
Manganèse	0,12	0,3	0,27
Zinc	0,15	0,16	0,18

> 100 %

80 %

90 %

> 100 %

> 100 %

> 100 %

90 %

75 %

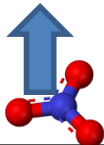
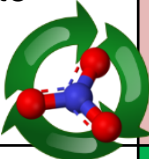
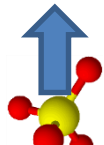
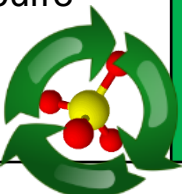
90 %

> 100 %

En cours d'analyse

Bouquets de fonctions offerts par les CIMS



	Crucifères pures	Légumineuses pures	Crucifères + légumineuses
Piège à nitrate 	100%	66%	98%
Effet engrais vert azote 	18%	100%	63%
Piège à sulfate 	100%	30%	99%
Effet engrais vert soufre 	100%	23%	85%

Pistes pour la sélection (2)

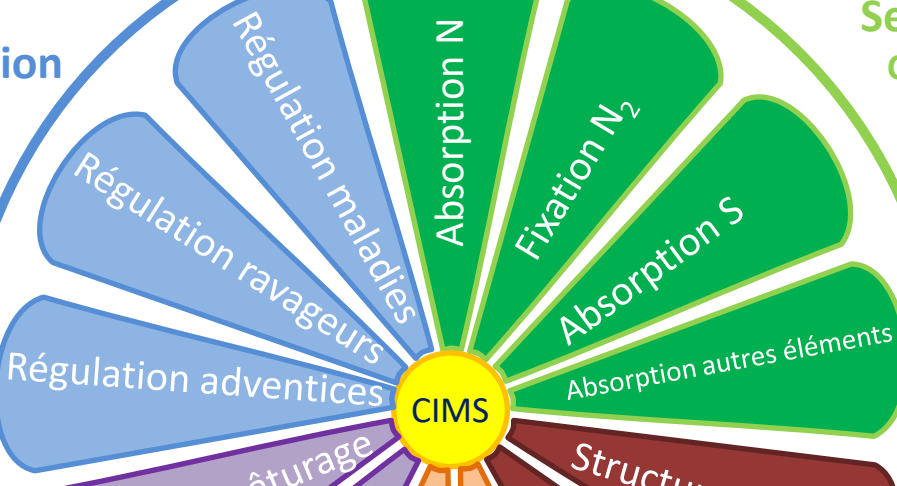


- ▶ Améliorer la connaissance des variétés : précocité, morphologie (et « plasticité » morphologique)
- ▶ Sélectionner des variétés avec des profils plus marqués : niveau de précocité ; dynamique de développement ; ...
- ▶ Besoin d'informations phénotypiques pour guider les assemblages d'espèces et variétés
= guide méthodologique pour concevoir les mélanges car toutes les combinaisons ne peuvent être testées expérimentalement...
(numériquement ??)

Bouquets de services attendus des CIMS



Service de régulation
des bioagresseurs



Service de soutien
Cycles des éléments
nutritifs

Service de soutien
Amélioration des sols

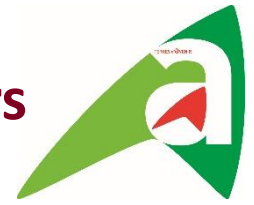
Service de régulation
du climat

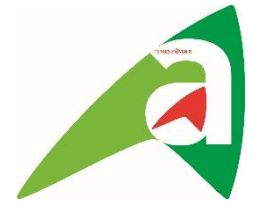


Cf. exposé de Stéphane Cordeau - INRA

Une voie prometteuse... ???

**Services et dis-services de régulation des bioagresseurs
par allélopathie et biofumigation**





Quelques définitions

Allélopathie

Tout effet direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante ou d'un microorganisme sur un autre organisme à travers la production de composés chimiques libérés dans l'environnement (Rice, 1984)

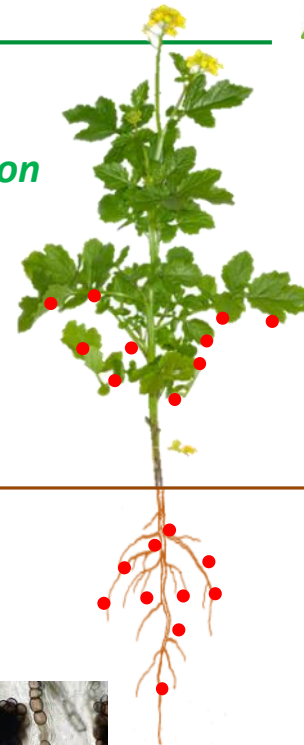
Bioagresseurs

= services de régulation

Auxiliaires

= dis-services

Adventices



Plantes
compagnes

Ravageurs

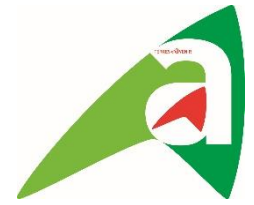


Maladies (telluriques)



Bactéries
symbiotes





Quelques définitions

Biofumigation

Suppression de pathogènes du sol par des composés biocides libérés dans le sol provenant de la biodégradation de la matière organique issue de composés végétaux.

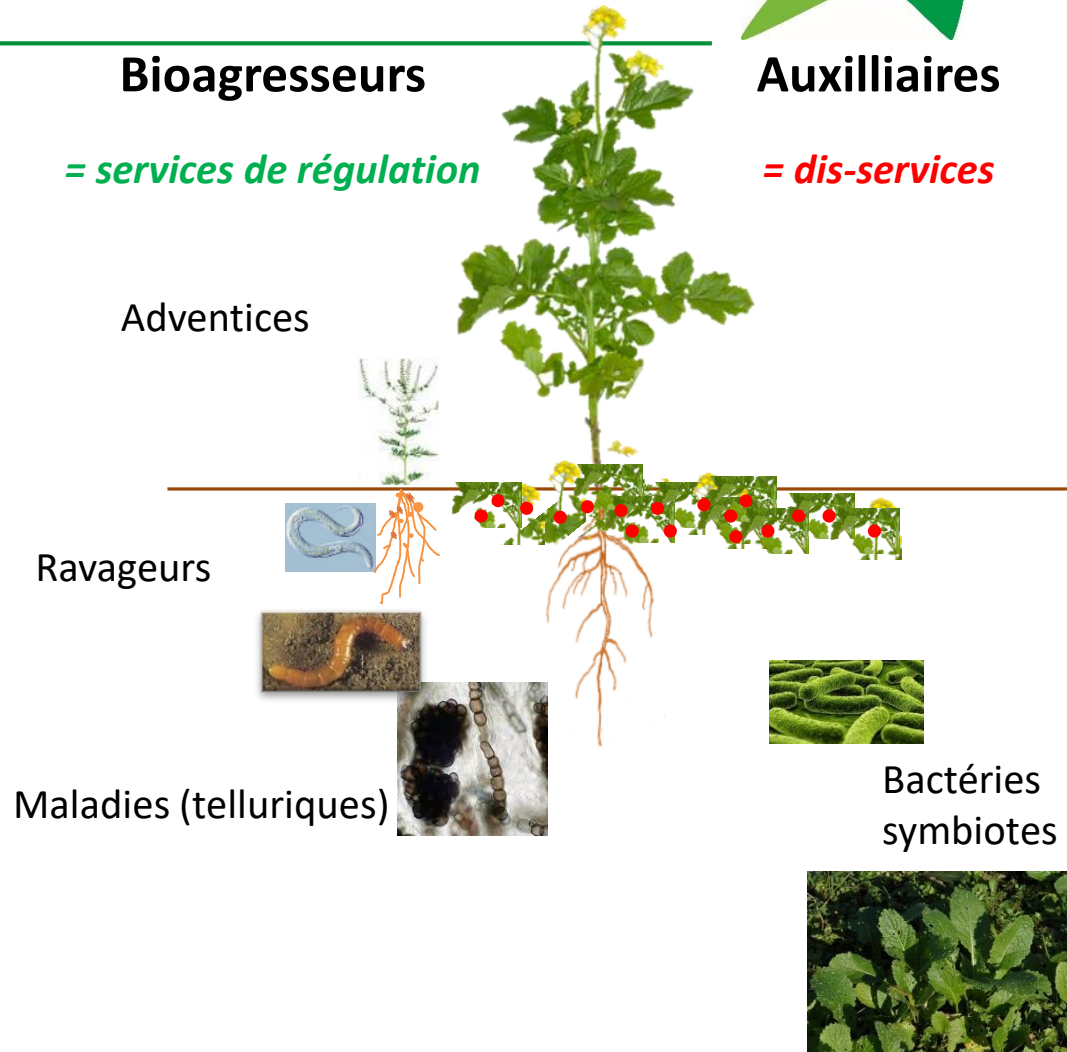
Initialement utilisé pour désigner les effets toxiques des Brassicacées (Kirkegaard et al., 1993)

Bioagresseurs

= *services de régulation*

Auxiliaires

= *dis-services*





Quelques définitions

Biofumigation

Suppression de pathogènes du sol par des composés biocides libérés dans le sol provenant de la biodégradation de la matière organique issue de composés végétaux.

Initialement utilisé pour désigner les effets toxiques des Brassicacées
(Kirkegaard et al., 1993)



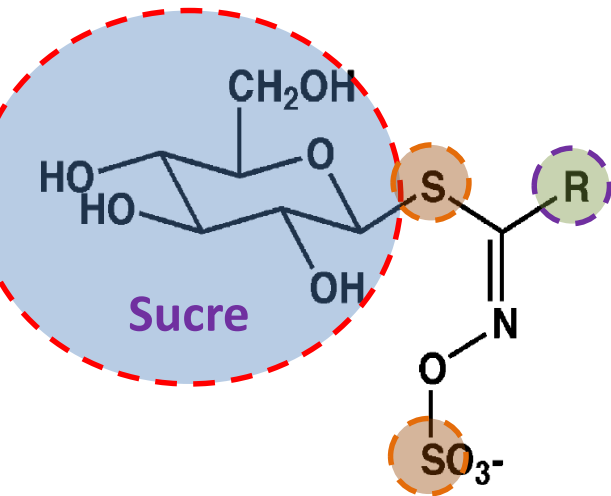
(©RAGT-Joordens)





Chez les Brassicacées...

Glucosinolates



Acides aminés	Glucosinolates (GSL)	Type de GSL
méthionine	glucoérucine, glucoraphanine, gluconapine, progoitrine,	 Aliphatique
alanine	glucocapparine	
isoleucine	glucocochlearine	
sérine	sinigrine	
valine	glucoputranjivine, isopropyle	
R phénylalanine	sinalbine, glucoaubrietine, gluconasturtiine, glucotropaeoline	 Aromatique
tyrosine		
tryptophane	glucobrassicine	 Indole
	4-hydroxyglubrassicine	
	4-methoxyglubrassicine	
	neoglucobrassicine	

(Agerbirk et Olsen, 2012)

Au moins 2 atomes de S + 1 atome de S

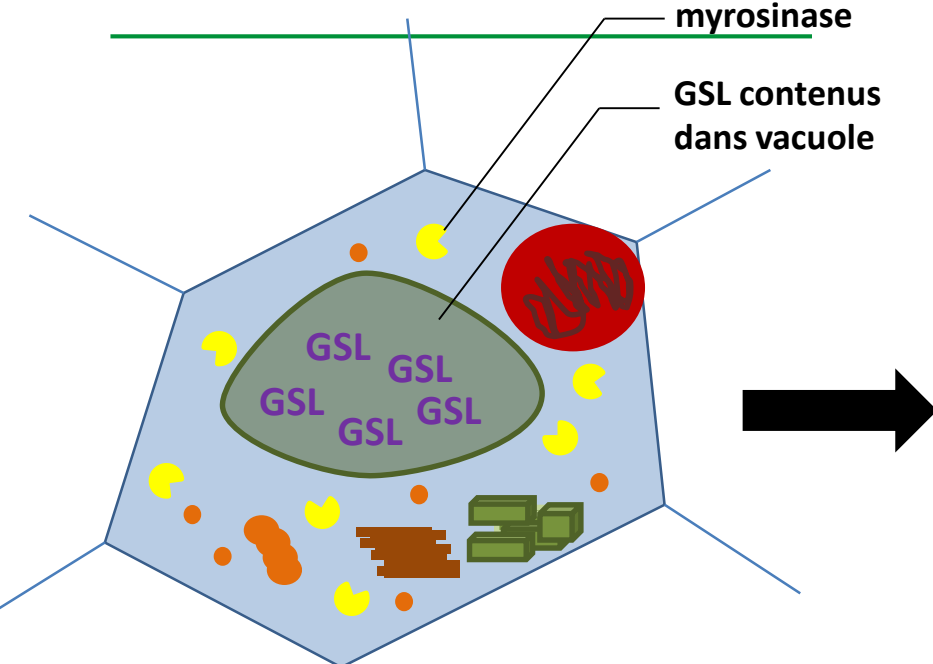




Chez les Brassicacées...

myrosinase

GSL contenus
dans vacuole



Modèle simplifié





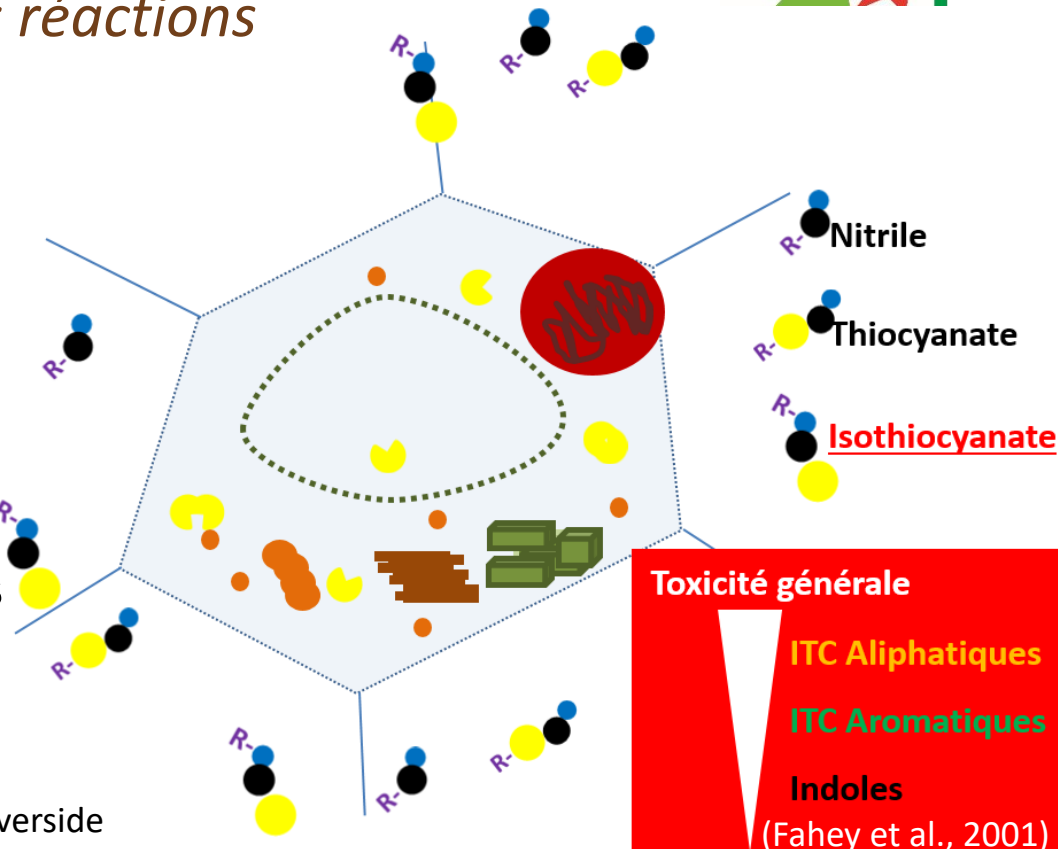
Biofumigation : Optimisation des réactions

- **Eau non limitante** (irrigation éventuelle)
- **Température « élevée »** (30-35°C) (Ploeg et Stapelton, 2001)



des
ables
thie

© UC Riverside



x Gaz toxiques



Potentiel de biocontrôle ?

Couëdel et al. (accepté, 2019)

Effets sur les ravageurs



Macrofaune pathogène aérienne

Pucerons
Coléoptères
Mouches
Limaces

Adventices

Champignons et bactéries pathogènes

R. solani
G. tritici
V. dahliae
A. euteiches
R. solanacearum
S. scabies
Fusarium spp.
Sclerotinia spp.
Pythium spp.

Nématodes pathogènes

M. incognita
P. neglectus
H. schachtii



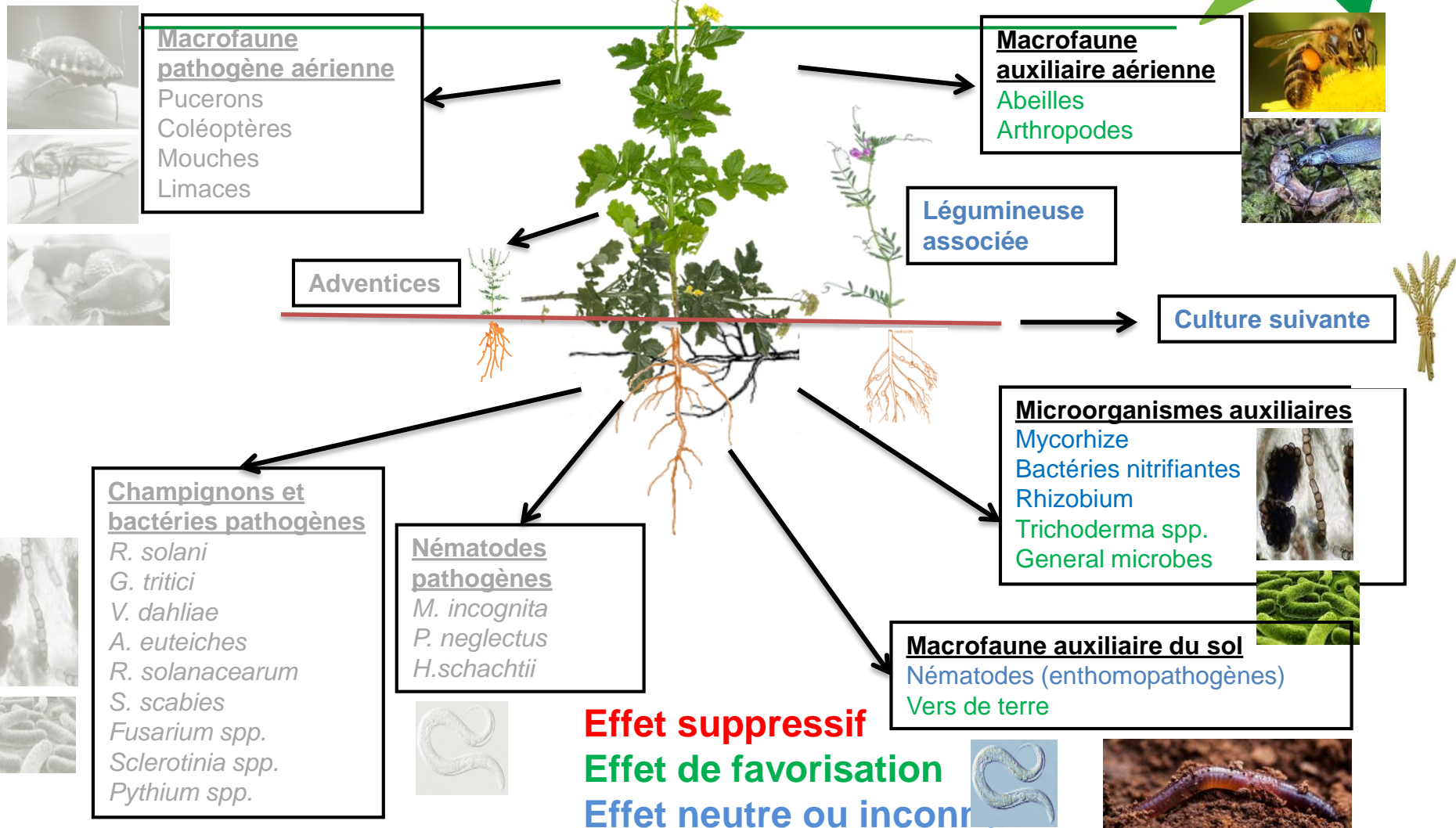
Effet suppressif
Effet de favorisation
Effet neutre ou inconnu

Potentiel de biocontrôle ?

Couëdel et al. (accepté, 2019)

Effets sur les ravageurs

Effets sur les auxiliaires



Potentiel de biocontrôle ?

Couëdel et al. (accepté, 2019)

Voie prometteuse mais nous n'en sommes qu'au début de l'histoire !!!

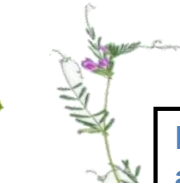
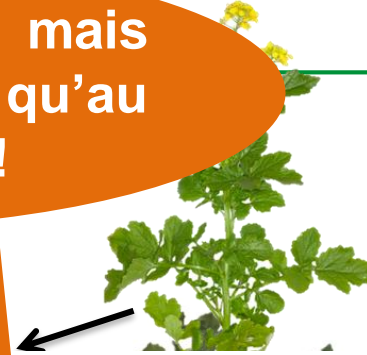
Effets sur les auxiliaires



Mouches
Limaces



Advent



Légumineuse associée

Macrofaune auxiliaire aérienne

Abeilles
Arthropodes



Culture suivante



Microorganismes auxiliaires

Mycorhize
Bactéries nitrifiantes
Rhizobium
Trichoderma spp.
General microbes



Macrofaune auxiliaire du sol

Protodes (entomopathogènes)
de terre



Champignons et bactéries pathogènes

R. solani
G. tritici
V. dahliae
A. euteiches
R. solanacearum
S. scabies
Fusarium spp.
Sclerotinia spp.
Pythium spp.



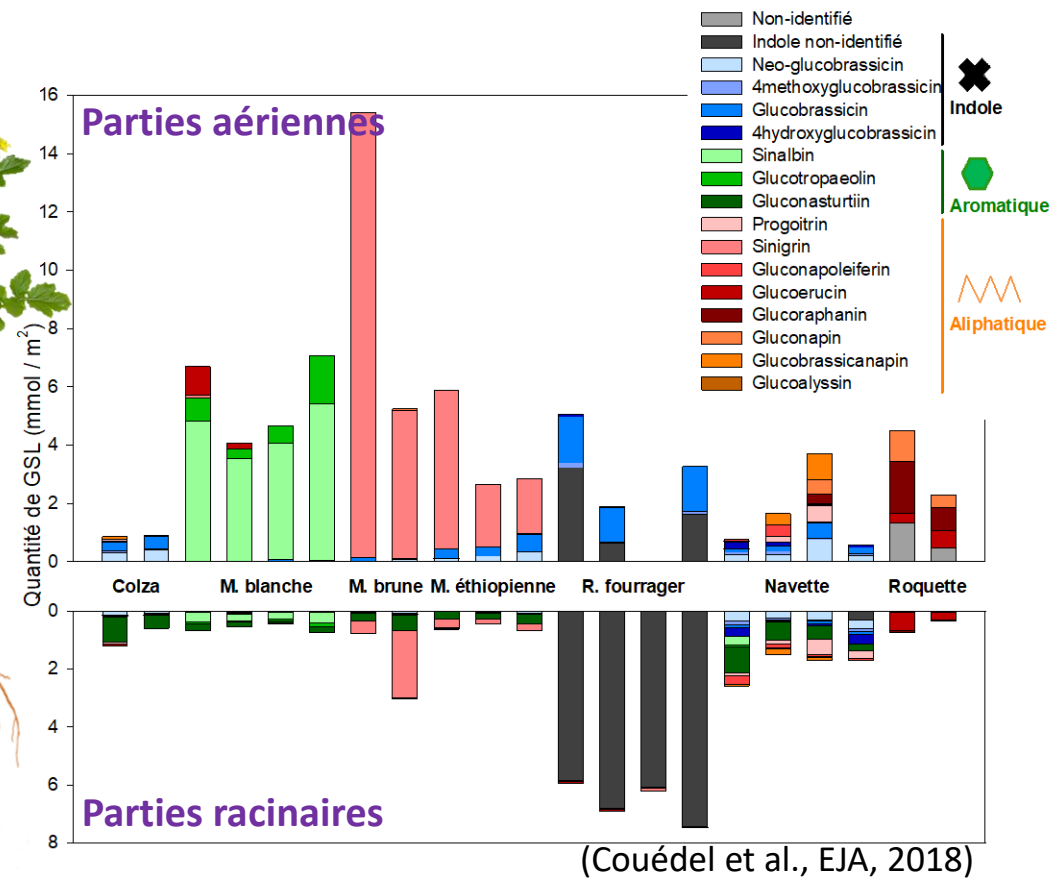


Variabilité génotypique

Méthodologie

→ Analyses sur 21 espèces / variétés de crucifères en culture pure (et mélanges)

→ Distinction entre parties aériennes et racinaires



CASDAR CRUCIAL



Résultats majeurs

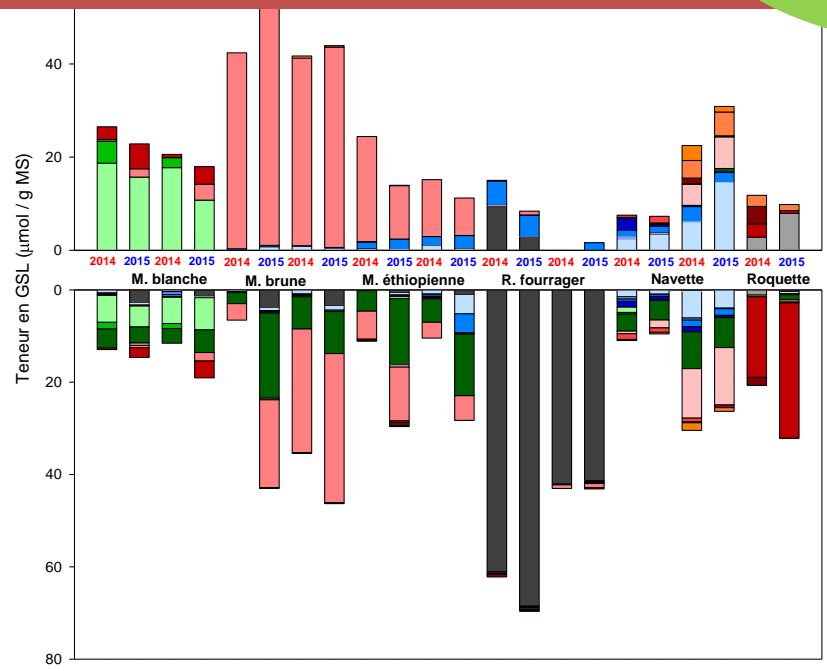
- Effet espèce ET variétal (pour certaines espèces : M. brune Etamine)
- Expression des potentiels génétiques ?
- Effort de sélection



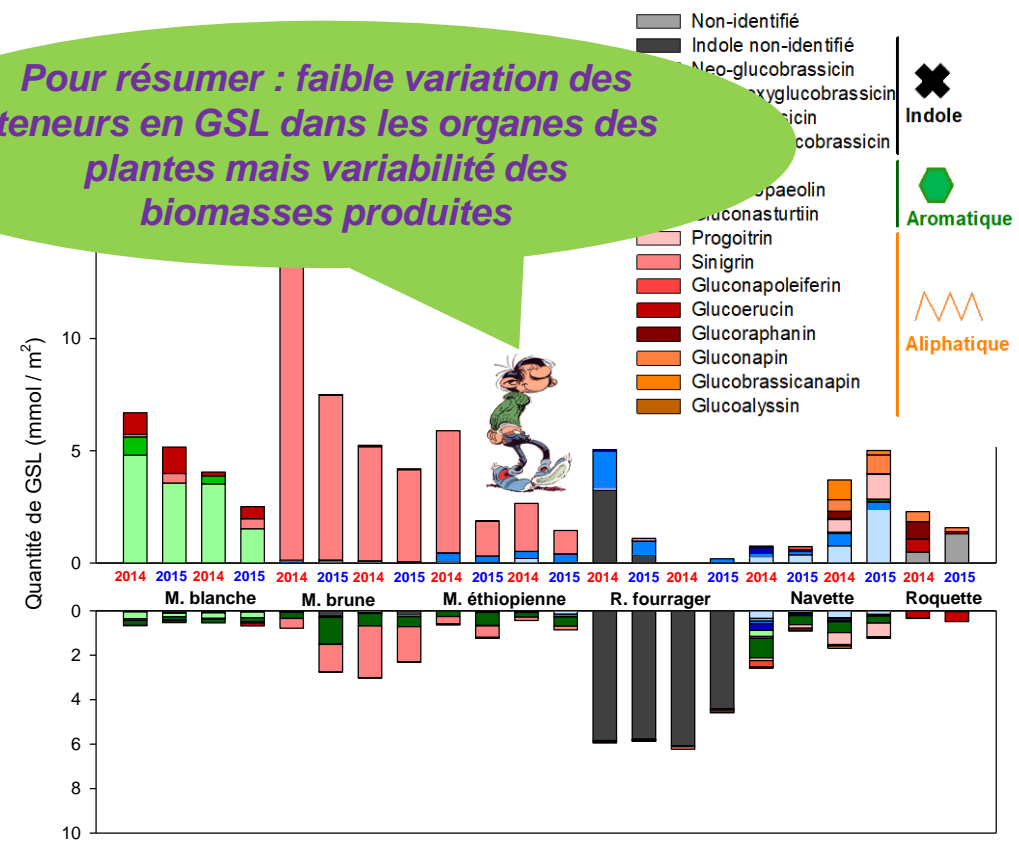


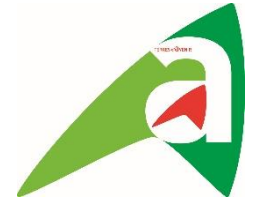
Variabilité environnementale

→ Teneurs homogènes entre années pour un même site



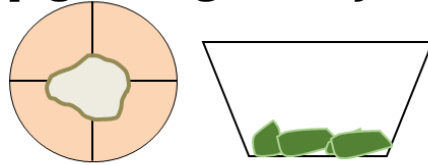
Pour résumer : faible variation des teneurs en GSL dans les organes des plantes mais variabilité des biomasses produites





Quelques effets de régulation biotique : étude sur *V. dahliae*

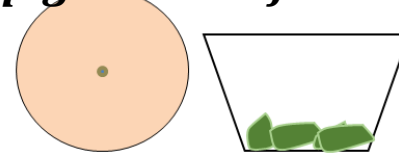
Champignon âgé de 8 jours



fond

Verre à bodega

Champignon sous forme de microsclérote



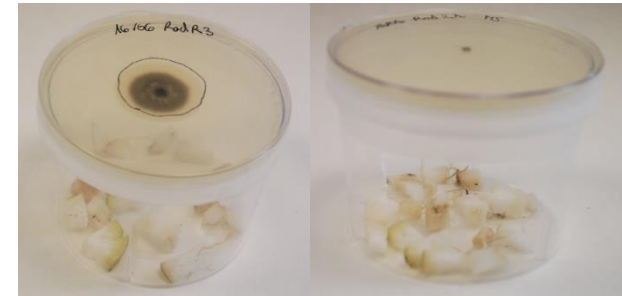
fond

Verre à bodega

Biomasse racinaire + aérienne

Biomasse aérienne

Biomasse racinaire



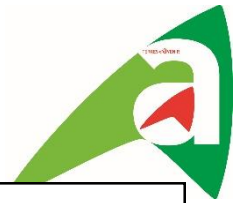
(Seassau et al., en préparation)

Suivi de la germination et du développement du pathogène

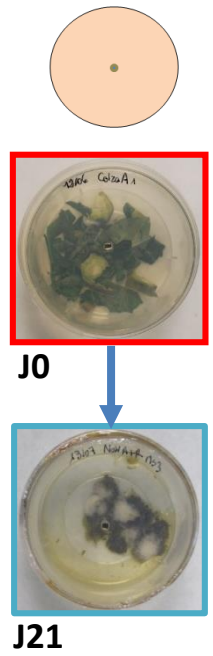


avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale «Développement agricole et rural»

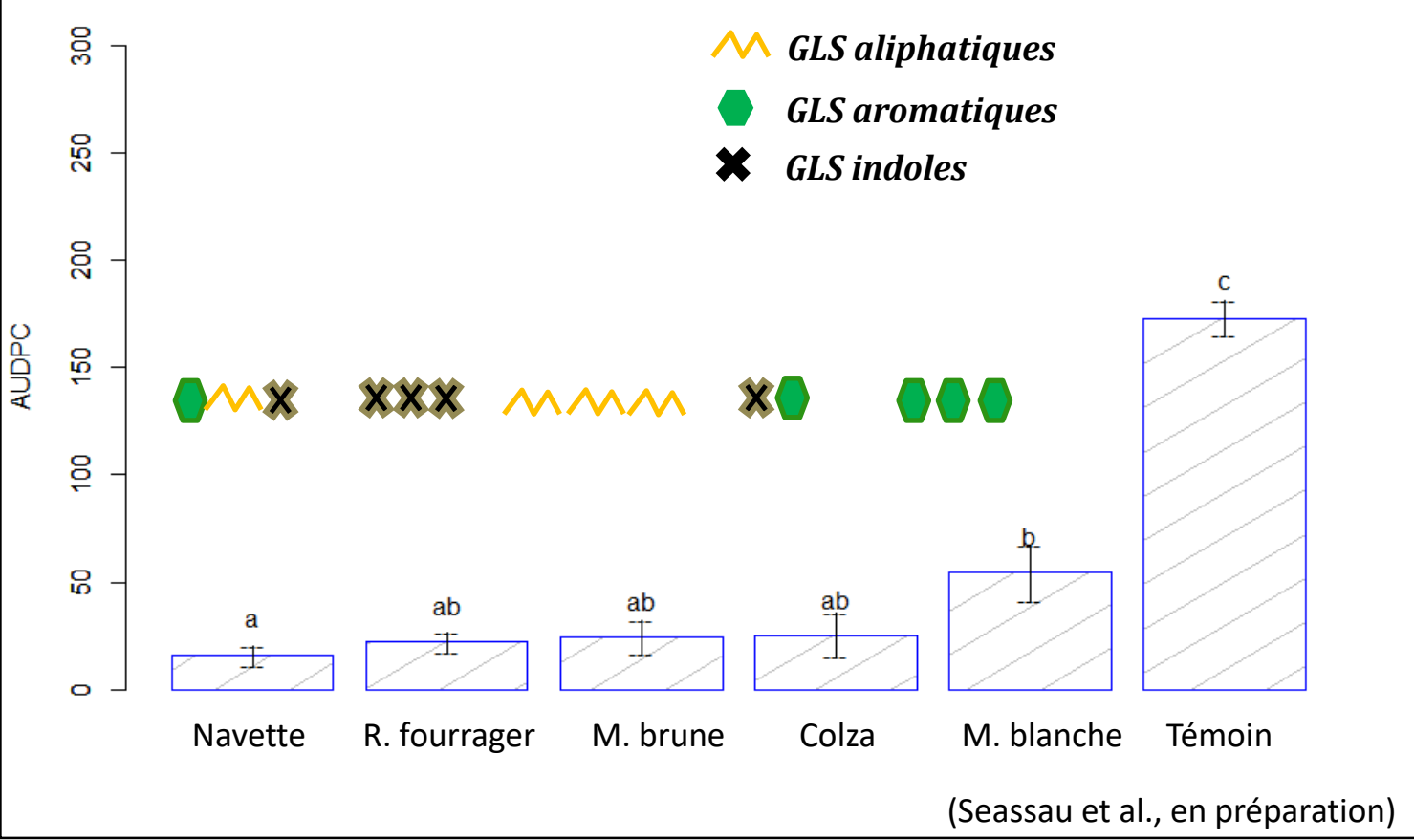
CASDAR CRUCIAL

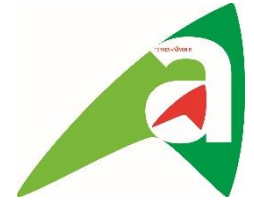


Quelques effets de régulation biotique : étude sur *V. dahliae*



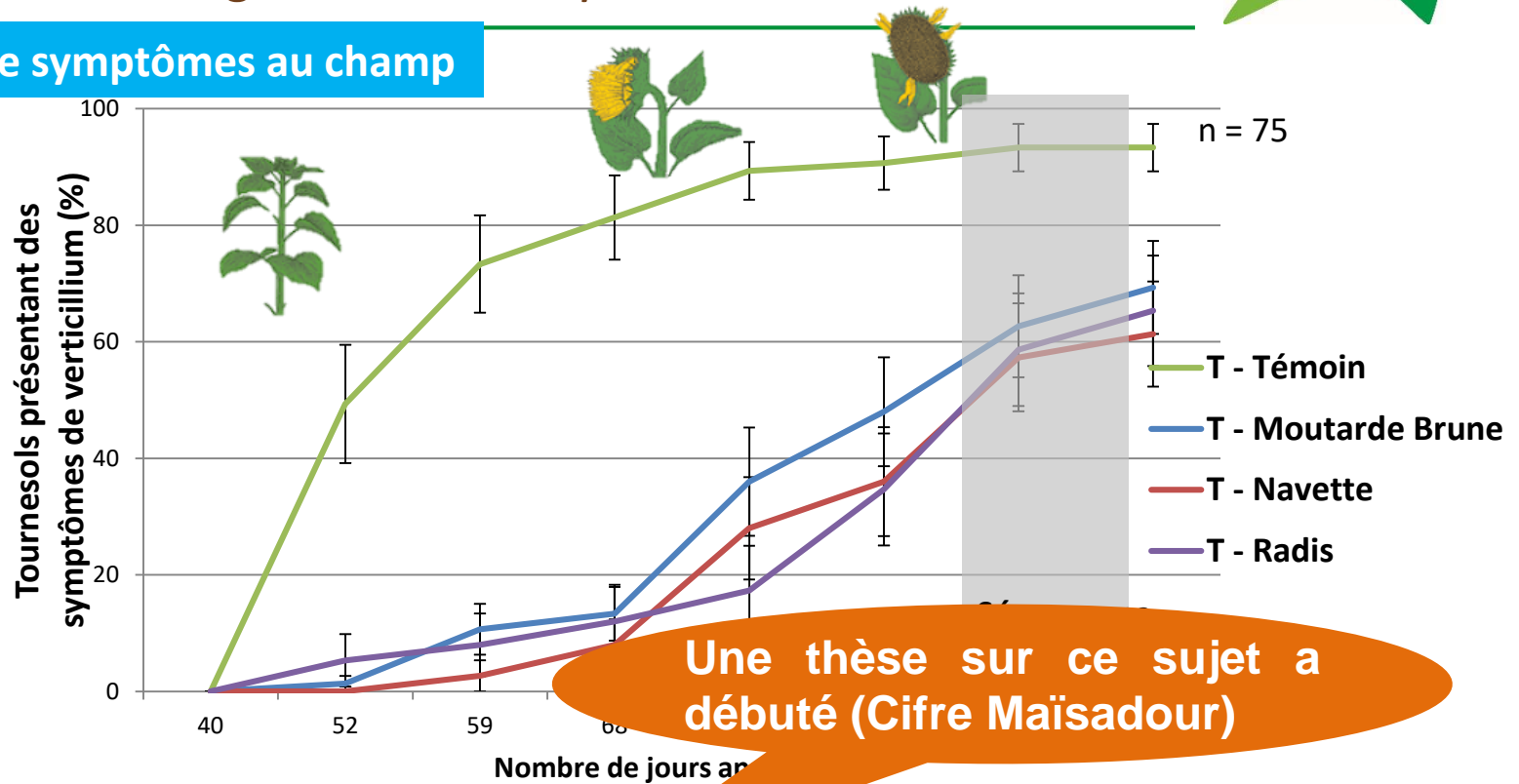
Germination du champignon





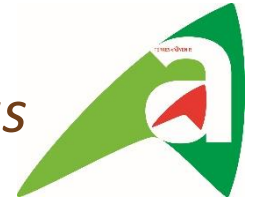
Quelques effets de régulation biotique : étude sur *V. dahliae*

➔ Expression de symptômes au champ



Une thèse sur ce sujet a débuté (Cifre Maisadour)





Quelques effets de régulation biotique : étude sur *A. sordidus*

Méthodologie

6 traitements :

- Témoin « sol nu » +
- Couverts : M. brune, Navette, R. fourrager + Vesce
- Tourteau de M. éthiopienne (BioFence)
- 10 larves / microcosme (10 répétitions)



→ Comportement alimentaire

→ Effet larvifuge

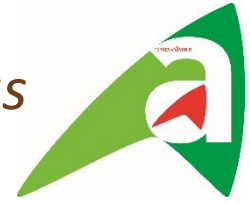
→ Effet larvicide



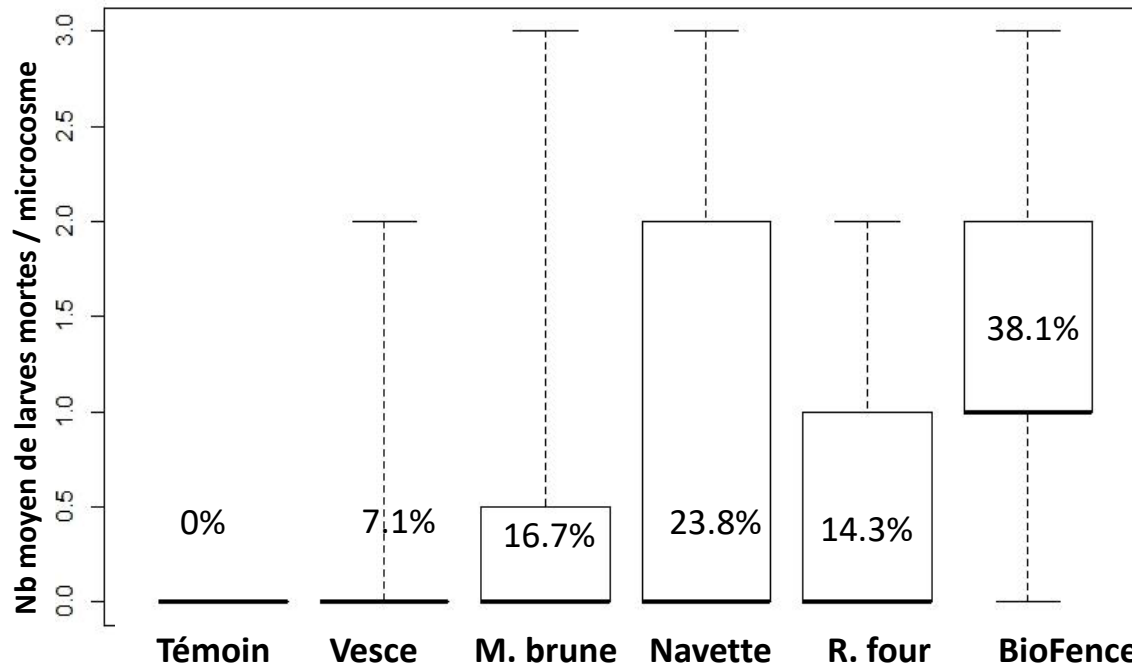
avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale « Développement agricole et rural »

CASDAR CRUCIAL

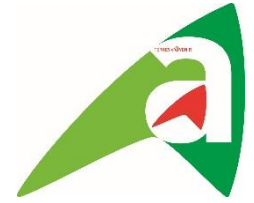
Quelques effets de régulation biotique : étude sur *A. sordidus*



- Aucun effet larvifuge
 - Aucun effet sur le comportement alimentaire des larves
 - Aucun effet larvicide des couverts étudiés
- ⇒ Effet larvicide du tourteau de *M. éthiopienne* (BioFence)



(David, 2017)



Eléments de [conclusion]...

(1) Les CIMS offrent d'importantes perspectives de services et fonctions agronomiques mobilisables dans la reconception de SdC économes et performants

(2) Leur introduction dans les SdC peut impliquer d'établir des **compromis de fonctions et de services** à déterminer : influence le choix des espèces / variétés

... et les mélanges d'espèces / variétés sont d'excellents candidats !

	Crucifères pures	Légumineuses pures	Mélanges crucifères + légumineuses
Fonction 1 : Piégeage d'Azote	100 % -51% à -70% du N minéral sur 0-90 cm	66 % -37% à -43% du N minéral sur 0-90 cm	98 % -48% à -70% du N minéral sur 0-90 cm
Fonction 2 : Piégeage de Soufre	100 % 10 à 15 kg S /ha	30 % 4 à 5 kg S /ha	99 % 10 à 14 kg S /ha
Fonction 3 : Engrais vert à Azote	18 % 1 à 10 kg N/ha libérés	100 % 35 à 54 kg N/ha libérés	63 % 18 à 30 kg N/ha libérés
Fonction 4 : Engrais vert à Soufre	100 % 6 à 8 kg S/ha libérés	23 % 1 à 2 kg S/ha libérés	85 % 5 à 6 kg S/ha libérés
Fonction 5 : Potentiel de biocontrôle	100 % Production de 3 à 4,5 mmolGSL m ⁻²	/	81 % Production de 2 à 3,5 mmolGSL m ⁻²

Pistes pour la sélection (3)



► Sélection d'espèces et variétés :

- adaptées à la destruction mécanique car objectif 0 herbicide pour la destruction des CIMS

- tolérantes à l'ombrage pour envisager de nouvelles possibilités pour des sous-semis dans des cultures comme le maïs ou les céréales (esquive des périodes estivales)

- de crucifères à floraison tardive pour maximiser le contenu en GLS avec un objectif de mieux cerner leurs effets sur les bioagresseurs

► Optimisation des ITK des CIMS : ex. forte compétition intra-spécifique observée





Merci de votre attention

Contact : lionel.alletto@occitanie.chambagri.fr