



Les nématodes à galles :

les connaître, les gérer en maraîchage sous abris

Projet GONEM



Colloque de restitution GONEM, 01/03/2022, CA du Vaucluse

Les nématodes du sol. Différents genres et espèces

✓ Ils font partie de la microfaune

Taille

1-100 μm

Micro-organismes



Bactéries



Champignons

100 μm – 2 mm

Microfaune & mésofaune



Protozoaires



Acariens



Collemboles



Nématodes

> 2 mm

Macrofaune



Diplopedes



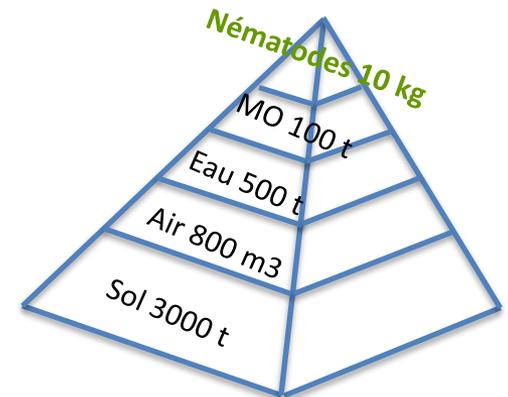
Vers de terre



Larves d'insectes

(C. Villenave, ELISOL, 2014)

néanmoins quantité importante dans le sol



Quantité dans le sol pour 1 ha de terres labourées

(Trudgill, 2000)

1 à 10 millions / m²

(Peterson & Luxton, 1982;
Lavelle & Spain, 2001)

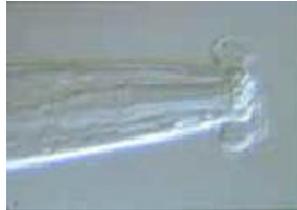
Plus de 200 espèces dans certains sites (biodiversité => bioindicateurs de la santé des sols)

(Yeates, 2003)

Les nématodes du sol. Différents genres et espèces

✓ Ils présentent une grande diversité trophique

- Omnivores (saprophages)



- Bactérovores



Rhabditide

- Entomopathogènes (parasites d'insectes)



Steinernema ou *Neoaplectana*

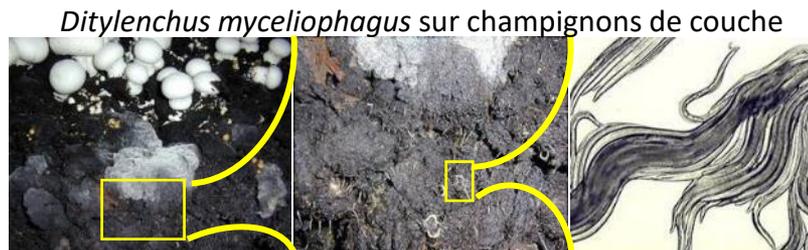
Mononchides



- Carnivores

utiles

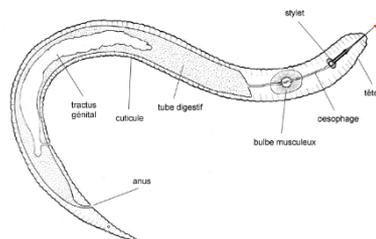
- Fongivores (parasites de champignons)



Ditylenchus myceliophagus sur champignons de couche

- **Phytoparasites (parasites de plantes)**

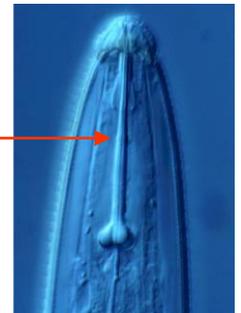
4500 espèces phytoparasites



Stylet buccal

Indispensable, il permet de :
 -perforer la paroi des cellules vég
 -aspirer le contenu des cellules
 -injecter des substances

nuisibles

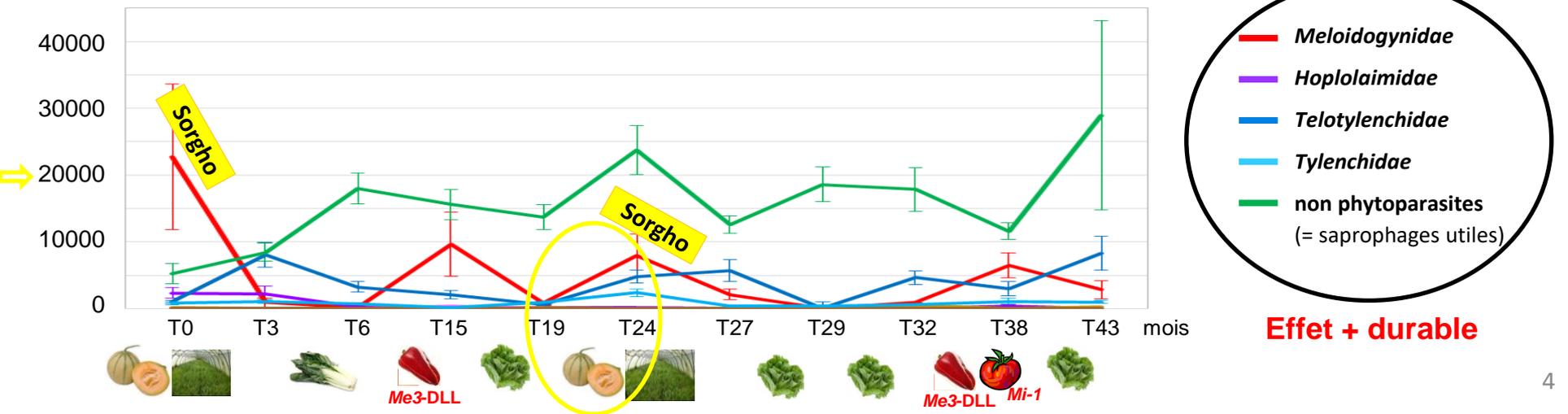


Les nématodes du sol. Différents genres et espèces

✓ Importance de la diversité de la nématofaune globale

Parcelles GEDUNEM 2012-2016
"sorgho Piper"

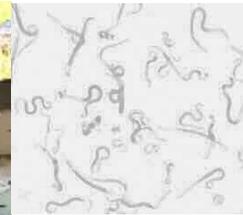
Nombre de nématodes/ dm³ de sol



Les nématodes phytoP. Des ennemis invisibles

✓ Invisibles à l'œil nu

- 0,015 à 3 mm de long: observations microscopiques obligatoires
- La majorité attaquent les organes souterrains des plantes (parasites telluriques): racines, tubercules, rhizomes...



Nématodes à lésions
(*Pratylenchus*)



✓ Pas toujours de symptômes spécifiques

- En particulier sur la partie aérienne des plantes: plantes chétives ou qui dépérissent



✓ Délai entre installation et apparition de symptômes visibles

- trop tard lorsque les dégâts sont visibles
(2 cycles de *Meloidogyne* pour voir un impact sur la physiologie de la plante)



Les nématodes phytoP. Caractéristiques

Parties de la plante attaquée

Tiges, feuilles
(*Aphelenchoïdes*)



Racines

Mode de nutrition

Ectoparasites

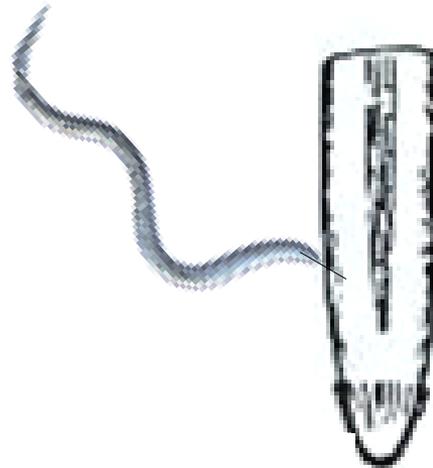
Cycle réalisé à l'extérieur de la plante (pas de pénétration dans la plante)

Endoparasites migrants

Cycle réalisés dans plusieurs plantes différentes

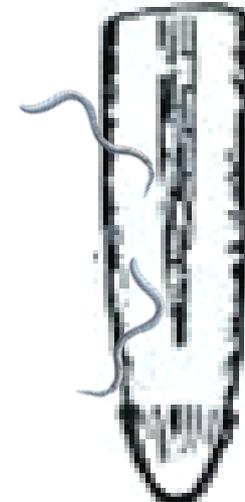
Endoparasites sédentaires

Cycle dans une seule et même plante



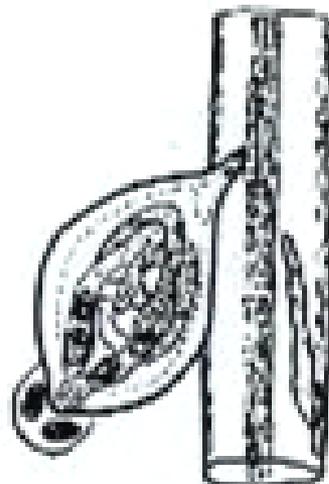
Racine

Tylenchus,
Filenchus,
Paratylenchus,
Tylenchulus,
Xiphinema,
Longidorus,
Trichodorus



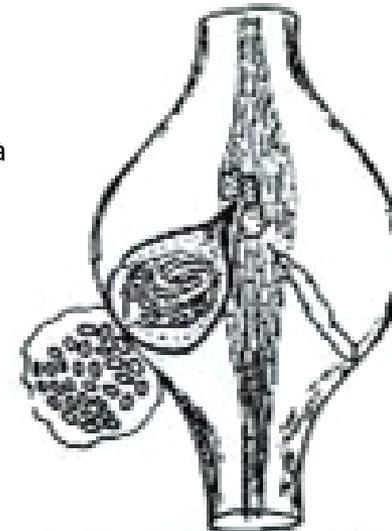
Racine

Helicotylenchus,
Hoplolaimus,
Tylenchorhynchus,
Histotylenchus,
Telotylenchus,
Pratylenchus



Racine

Nématodes à kystes:
Heterodera,
Globodera



Racine

Meloïdogyne
(majoritaire sur tous les sites GONEM et quasi exclusif sur certains sites)

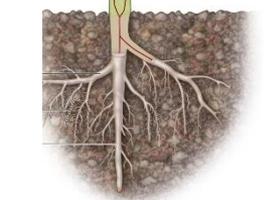
Les nématodes phytoP. Caractéristiques

Parties de la plante attaquée

Tiges, feuilles



Racines



Mode de nutrition

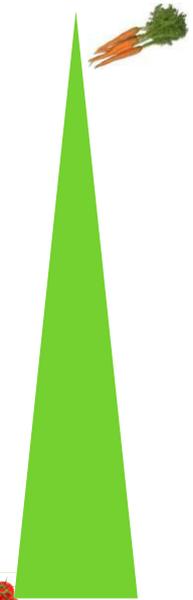
Ectoparasites
Cycle réalisé à l'extérieur de la plante (pas de pénétration dans la plante)

Endoparasites migrants
Cycle réalisés dans plusieurs plantes différentes

Endoparasites sédentaires
Cycle dans une seule et même plante

Gamme d'hôtes

Spécifiques
Heterodera carotae

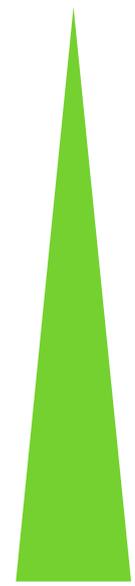


Polyphages
Meloidogyne



Survie

+/-Faible (qq mois)
Pratylenchus



Forte (x années)
Nématodes à kystes,
Nématodes à galles

Mode de reproduction

Sexuée (accouplement)



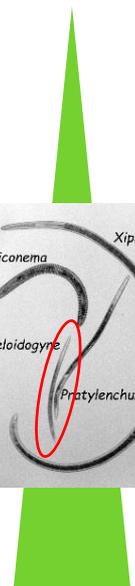
Parthénogénèse
(chez plusieurs espèces, mâle absent ou ne sert pas à la reproduction)



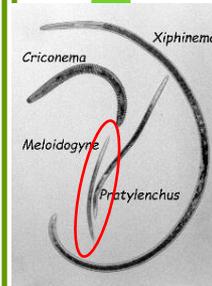
femelles
Meloidogyne

Taille

0,015 mm

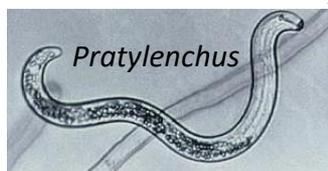


5 mm



Forme

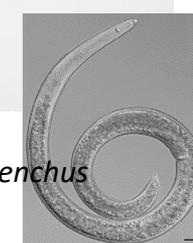
Larves et adultes (même forme mais tailles différentes)



Pratylenchus

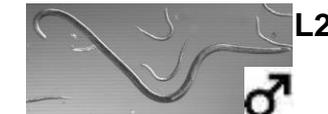


Xiphinema



Helicotylenchus

Larves et adultes (formes et tailles différentes)



L2



♀

Meloidogyne

Les nématodes à galles. Espèces en culture maraîchère en France

M. incognita et *M. arenaria*

Les plus répandus dans le sud de la France
Sur toutes cultures
Reproduction parthénogénétique : pas de sexe



M. hapla

Rare, plutôt régions septentrionales, nord de la France
Sur pomme-de-terre, betterave, carotte,
rosier, arbres fruitiers, laitues...
Galles plus petites
Reproduction sexuée ou parthénogénétique facultative



M. chitwoodi (et *M. fallax*)

Des foyers en Bretagne, organismes de quarantaine => lutte obligatoire
Sur pomme de terre, carotte, maïs, betterave, salsifi, poivron, tomate...
Reproduction sexuée



90 espèces de *Meloidogyne* présentes en Europe et pouvant provoquer des dégâts sur les cultures
(d'après Wesemael et al., 2011) (cf tableau dans Infos CTIFL, 2013)

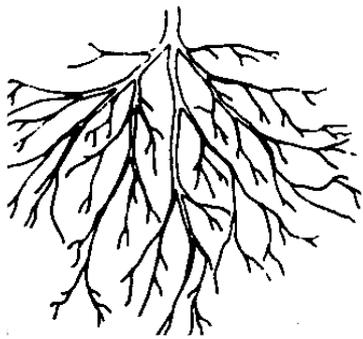
Les nématodes à galle. Dégâts sur cultures



Les nématodes à galles. Estimation des dégâts

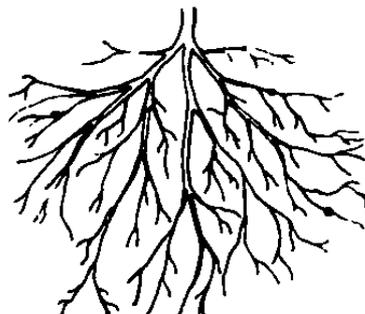
Echelle de Zeck 1971: Indice de galles sur racines (0 à 10)

0



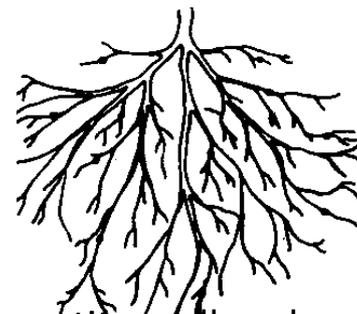
pas d'infestation

1



très peu de galles
et de petite taille

2



petites galles plus
facilement détectables

3



nombreuses
petites galles

Seuil de nuisibilité dépend des cultures :

**100 à 1000 larves / dm² de sol
ou 10 à 100 / g de racine**

4



nombreuses petites
galles ; quelques
grosses galles

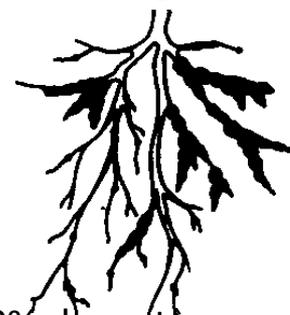
5



25% du système racinaire
comportant des galles et
ne fonctionnant plus

Après 2 cycles

6



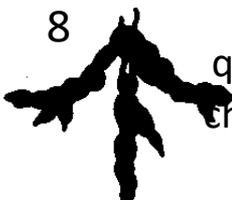
50% du système racinaire
comportant des galles et
ne fonctionnant plus

7



75% du système racinaire
comportant des galles et
ne fonctionnant plus

8



quasiment plus de radicelles ;
chapelets de grosses galles sur
les racines principales

9



système racinaire réduit, rempli
de grosses galles empêchant la
plante de se nourrir

10



plante et racines
mortes

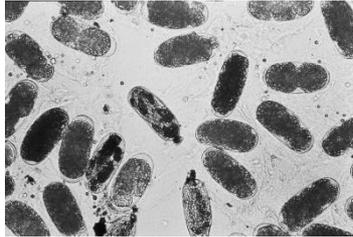
Les nématodes à galle. Cycle de vie

plusieurs
générations/an

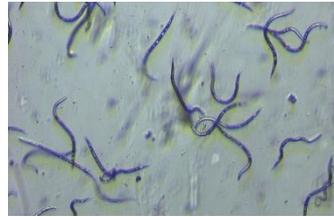


à T0

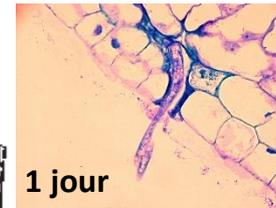
Oeufs contenant les larves



Larves libres dans le sol

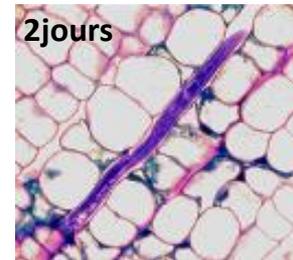


J2



1 jour

Pénétration des larves
dans les racines



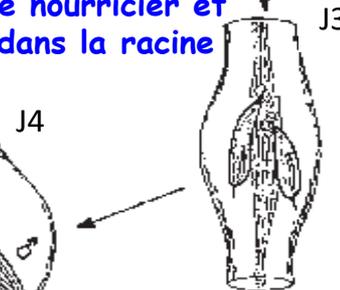
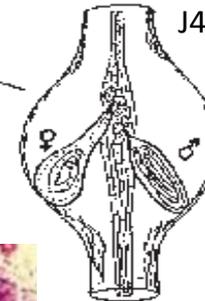
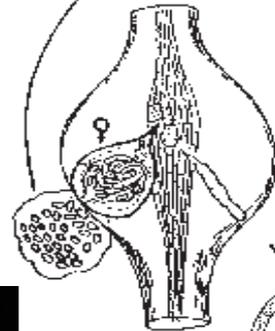
2 jours



3 jours

invasion racinaire

induction du site nourricier et
établissement dans la racine

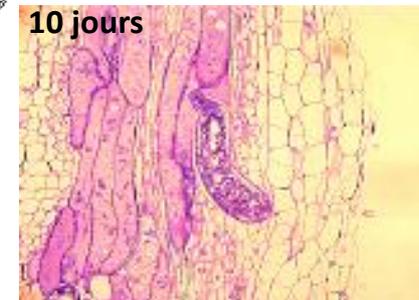


10 jours

Migration,
fixation au
cylindre central



20 jours



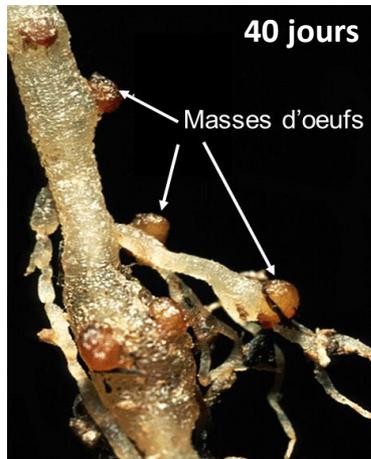
Injection de salive dans les
cellules et absorption de sève

Galles et pontes
sur racines



40 jours

Masses d'oeufs



Pontes à l'extérieur des racines
(300 à 1000 oeufs/ponte)

Femelle

de T+ 21 à 90 jours
selon la
température
(~4 semaines en
été dans le Sud)

Les nématodes à galle. Biologie

Températures seuil (S) et optimale (O) *mesuré entre -10 et -20 cm de sol*

T° C du sol :		5	10	15	20	25	30	35	40
<i>M. hapla</i> & <i>M. chitwoodi</i>	Infestation	S-----			O		-----S		
	Dévelop ^t production d'ω			S-----		O		-----S	
<i>M. incognita</i> & <i>M. arenaria</i>	Infestation		S-----			O		-----S	
	Dévelop ^t production d'ω			S-----		O		-----S	

Calcul du nbre de °C.jours requis pour l'accomplissement du cycle:

$$\text{°C.jour} = \left(\frac{T \text{ min} + T \text{ max}}{2} \right) - T \text{ base (température de base)}$$

Exemple: Si le maximum pour une journée est de 19.5°C, le minimum est de 9°C et la température de base est de 10°C, la formule devient :
 $9 + 19.5 = 28.5 / 2 = 14.25 - 10 = 4.25$ degrés-jour.

	Tbase	Nbre de °C.jours	durée du cycle approximatif / T°C
<i>M. chitwoodi</i>	5	491	57 js à 16°C
<i>M. hapla</i>	8	554	65 js à 16°C
<i>M. arenaria</i>	9	380	63 js / 16°C , 24 js / 25°C
<i>M. incognita</i>	10	400	

Dépend des espèces de nématodes mais aussi de plantes

(cycles plus courts pour poivron comparé à tomate par exemple)

Les nématodes à galles. Conditions optimales de maintien et migration dans les sols

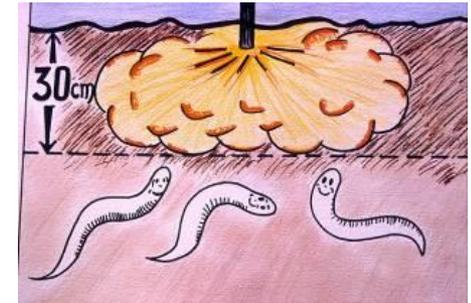
Conditions optimales de développement

- ✓ températures élevées 20-25°C (et dormance <10°C)
- ✓ sols humides jusqu'à la capacité au champ mais non inondés
- ✓ sols sableux, légers, ou pauvres en matière organique
- ✓ succession de plantes sensibles et rotation peu diversifiée
- ✓ mauvaises herbes = réservoirs



Conservation

- ✓ jusqu'à 30 cm de profondeur et plus
- ✓ jusqu'à 1 an et plus en absence d'hôte
- ✓ après éclosion, mortalité des larves si sol vraiment trop sec ou complètement inondé pendant plusieurs semaines (asphyxie ou épuisent leurs réserve sans plante hôte)



Migration

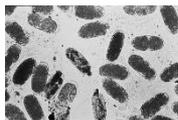
- ✓ qq cm horizontalement (en sol sableux fin)
- ✓ 30 cm et + verticalement (surtout si entraîné par l'eau)
- ✓ quasi pas de migration en sol très argileux (> 30% argile)
- ✓ dispersion par l'eau et l'homme (travail du sol)



Les méthodes de lutte. En fonction du cycle

SOL

Éclosion et pénétration



Masse d'œufs



L2

Couverts assainissants en hiver, biofumigants, pièges

Engrais vert d'été, biofumigants, pièges

SDP, agents de lutte biologique

Fort apport de MO

Solarisation

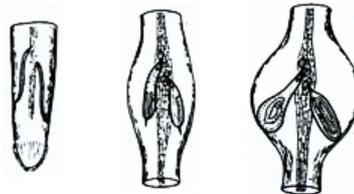
Jachère noire

Inondation (désinfection anaérobique)

Fumigants chimiques

PLANTE

Développement



L2, L3 puis L4

Diversification des cultures, rotation avec cultures moins sensibles, mauvais-hôtes

Variétés résistantes

Reproduction



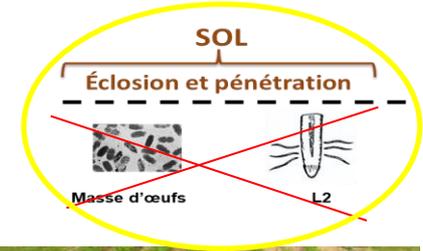
Femelle (& mâle)

Produits chimiques systémiques

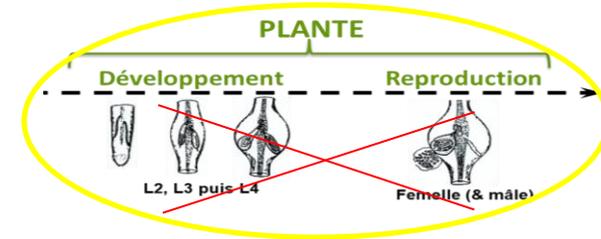
Prophylaxie

1. Prophylaxie

Eviter de contaminer des parcelles saines



Réduire les risques de sur-infestation et de dissémination des nématodes dans les parcelles déjà infestées



Décalage des dates de semis ou plantation

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
									Salade sensible					
									Salade sensible					

températures plus fraîches => activité des nématodes réduites



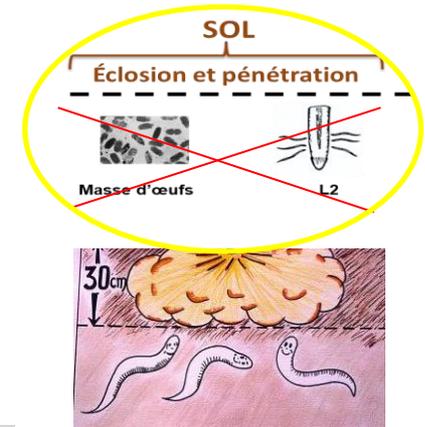
amaranthes, morelles, chénopodes, rumex... sont des réservoirs de nématodes à galles

Pas encore d'essai probant

2. Solarisation

Destruction des œufs et larves par la chaleur (eau/soleil)

Été: 45 js minimum ou 250 h d'ensoleillement > 40°C sur 25 cm de profondeur



Courgettes T0 Jun 2009				
A	B	C	D	30
				29
8	7	7	8	28
9,5	7	8,5	8	27
8	7	7	7	26
7,5	8	7	8	25
7,5	8	8	8	24
9,5	9	10	9	23
10	10	9	9	22
9,5	8	8	10	21
9	9	8,5	9,5	20
9	9	9	9	19
9	10	9,5	9,5	18
10	8	9,5	9,5	17
9	8	9,5	8	16
				15

**Solarisations
été
2009,
2010,
2012,
2014**

Courgettes T+7 ans Jun 2016				
A	B	C	D	30
				29
10	4	4	10	28
10	3	2	10	27
10	2	2	10	26
10	1,5	6	10	25
10	3	4	10	24
10	4	3	10	23
10	1	4	9	22
9	2	2	9	21
9	1	1	8,5	20
8	2	2	9,5	19
8	1	3	9	18
10	4,5	1	10	17
10	4	3	9	16
				15

salades
sensibles

mâche non
hôte

Essais GEDUNEM 2012-2016: Efficacité sur rangs centraux de la parcelle
Conditions de mise en œuvre importantes

3. Apport massif de matière organique

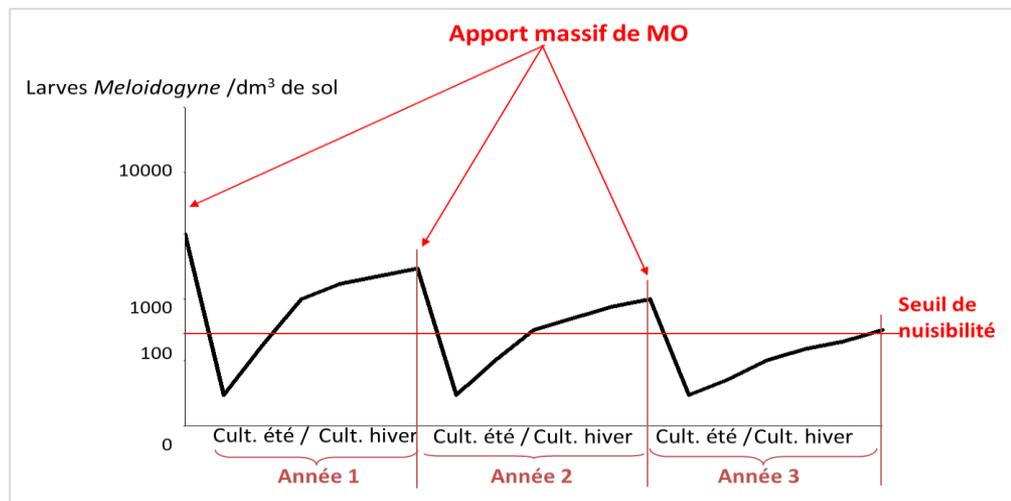
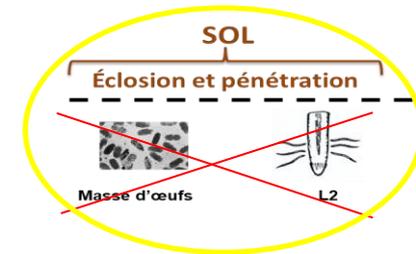
- ✓ MO animale (fumier cheval, vache, mouton, poule)
- ✓ Tourteaux végétaux de ricin, neem
- ✓ Composts (déchets verts, résidus de cultures de concombre, piment, tomates ou de plantes à haut taux d'azote)



Modes d'action :

Direct : libération de molécules nématocides (azadirachtine, nimbine, ricinine, acides organiques volatils)

Indirect : stimulation de l'activité et diversité des organismes du sol, fertilité du sol, croissance des plantes, modification des composantes biochimiques du sol

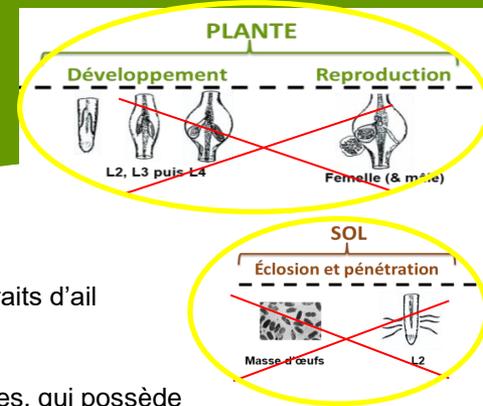


Efficacité théorique, Cayrol 1986

Résultats positifs / *M. hapla* avec 30t/ha/an fumier de Cheval (Essais Ctifl 'Gedubat')

Efficacité variable (sol, T°C), limitée pour tourteaux et composts (Essais Grab), à étudier sur le long terme

4. SDP, Agents de biocontrôle



✓ Biopesticides issus de plantes

NEMGUARD de Certis, AMM 2016, non autorisé en bio

Autres extraits de plantes (Tanins de châtaigner de Vivagro, Larvasoil de BioDevas)
AMM MFSC= matière fertilisante, support de culture



Chimique dérivé d'extraits d'ail



Tannins = polymères de sucres, qui possède la capacité de se combiner avec les protéines: perturbent le milieu, activités nématocide, fongicide, bactericide...

✓ Biopesticides issus de micro-organismes

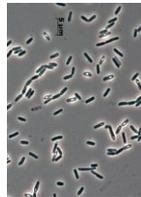
NEMAQUILL/RACINET d'Arvensis Agro (E) ou Protema Agri (I): AMM MFSC



✓ Auxiliaires naturels

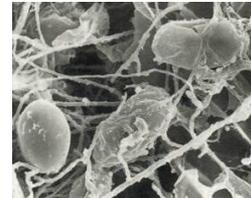
Bactéries

'Flocter' de BASF (AMM)

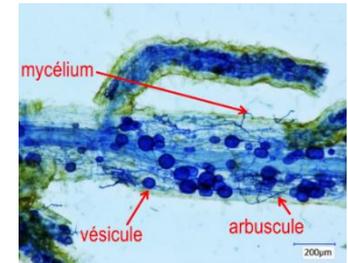


Champignons

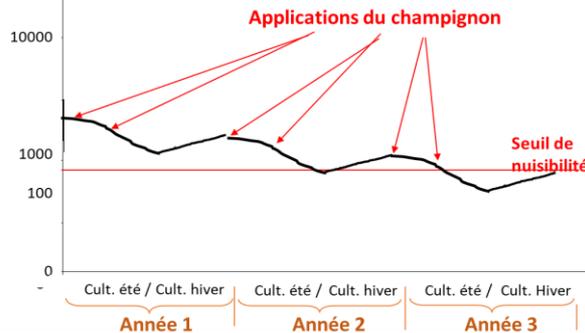
Purpureocillium lilacinum
251 'BIOACT PRIM' de Bayer (AMM)



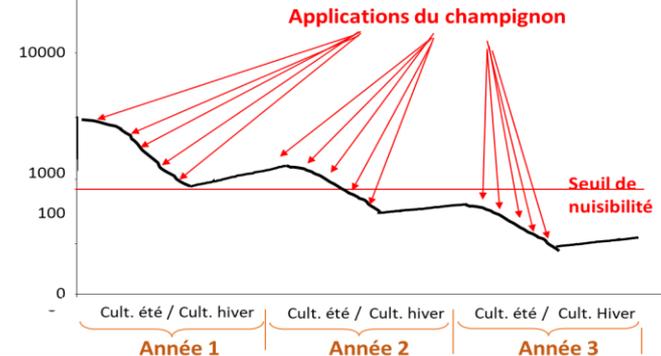
Mycorhizes (AMM MFSC)



Larves *Meloidogyne* /dm³ de sol

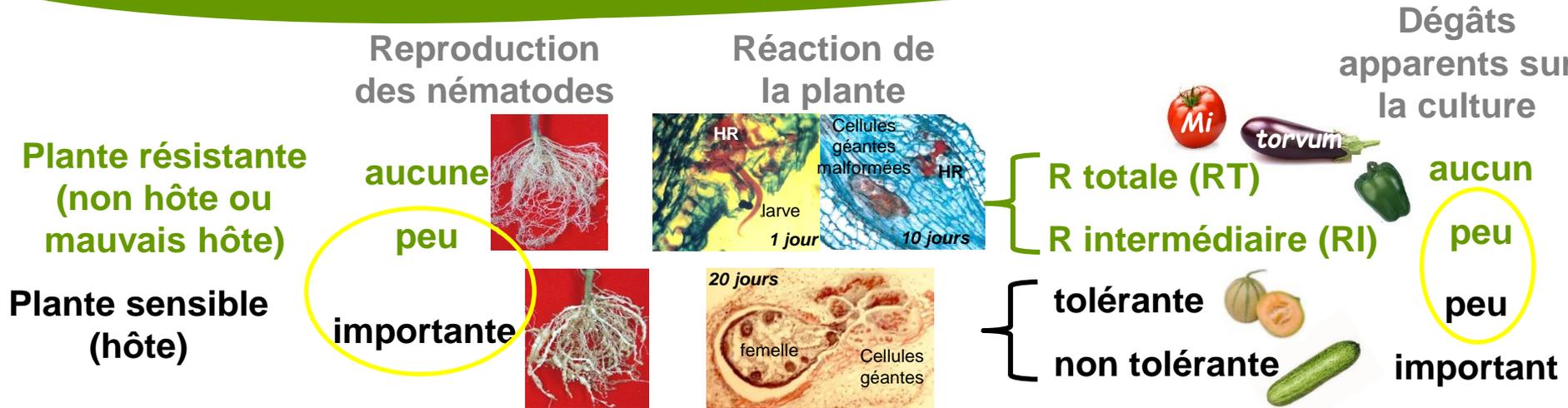


Larves *Meloidogyne* /dm³ de sol

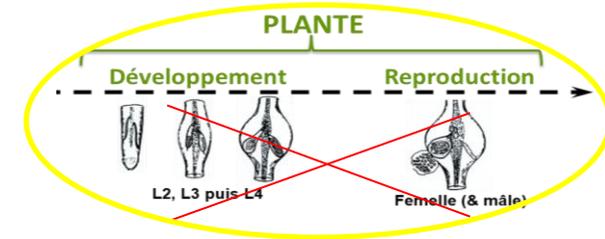
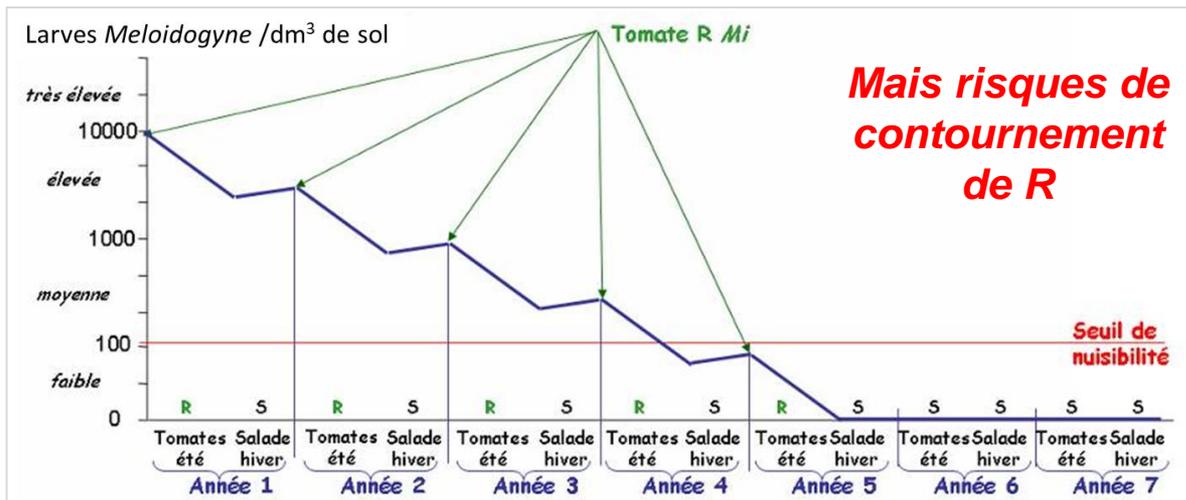


Essais avec *P. lilacinum*, Cayrol 1986

5. Variétés et porte-greffes résistants

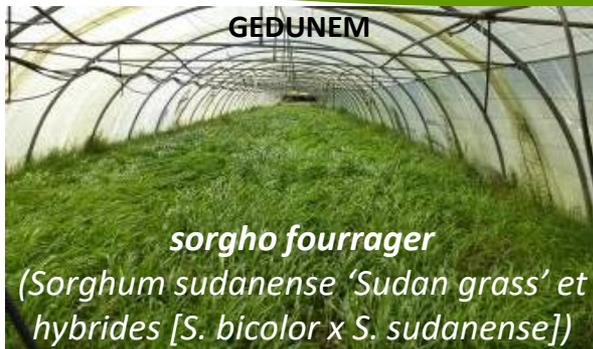


Plantes résistantes attirent les nématodes et les empêchent d'accomplir leur cycle (plantes pièges)



Enquête 2008 chez un producteur maraîcher du 06

6. Engrais vert d'été



Sorghos fourragers
(Poaceae= graminées)

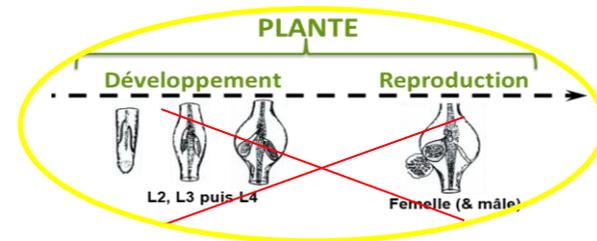
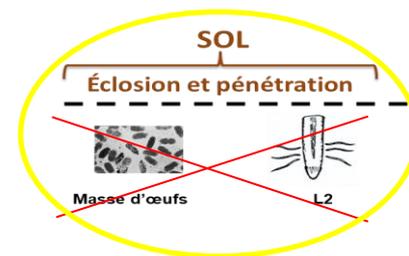
autres plantes



1/ Biofumigation: Sorghos riches en dhurrine, glucoside cyanogène => libération de cyanure d'hydrogène (HCN) nématocide après enfouissement et décomposition dans le sol (autres molécules nématocides / autres plantes)

+ Biodésinfection anaérobie : Eau + bâchage VIF peut améliorer l'efficacité

2/ Plantes-piège mauvais-hôtes



3/ Effet indirect: ajout de matière organique et d'azote: favorise la croissance des racines, favorise les prédateurs naturels, améliore le sol

6. Engrais vert d'été

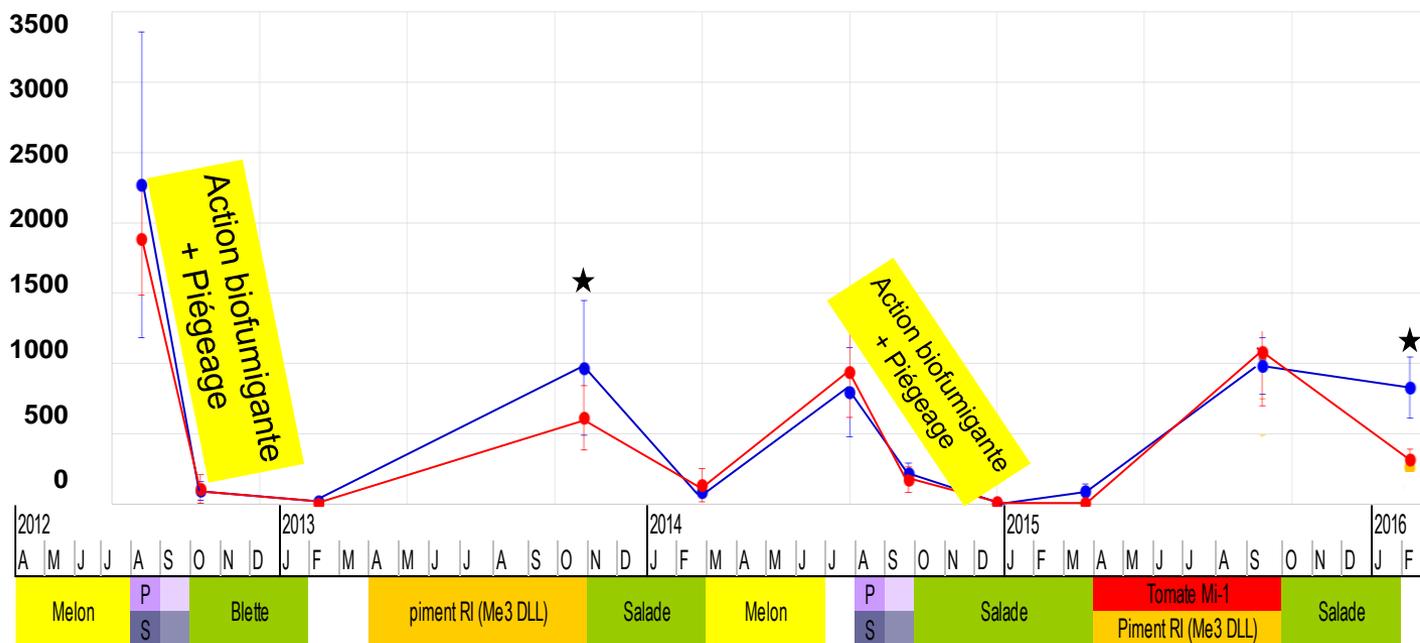
Projet GEDUNEM 2012-2016

Essais sorghos sur site Lambesc (Ar)



Nombre de nématodes/ 100g de sol

Site Lambesc



➤ **Bonne efficacité des sorghos si bien utilisés (>90%)**

4 semaines de culture de sorgho, broyage, enfouissement et fermeture du sol pendant 10-20 jours (pas de VIF)

6. Engrais vert d'été

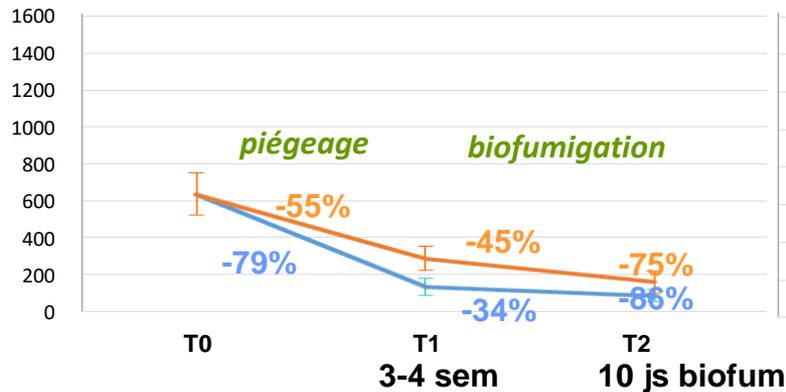
Projet GEDUNEM 2012-2016

Essais sorghos en condition contrôlées

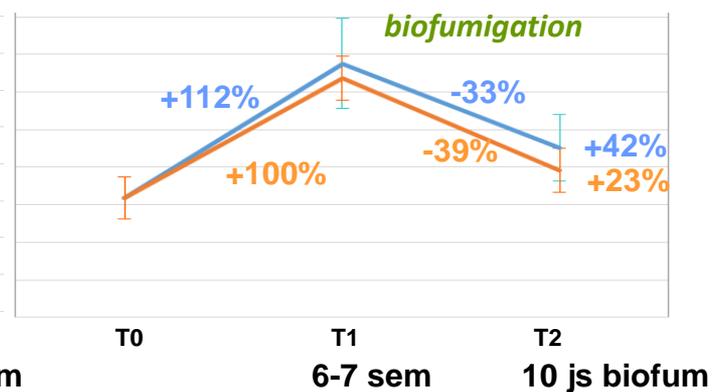


Population de *M. incognita* / kg de sol (argileux)

Sorghos enfouis après 3-4 semaines
(stade 4 feuilles)



Sorghos enfouis après 6-7 semaines
(stade 8 feuilles)



Sorgho Piper
Sorgho 270911

Mode d'emploi important !

7. Couvert assainissant en hiver

1/ Plantes naturellement riches en glucosinolates: *Brassicaceae*

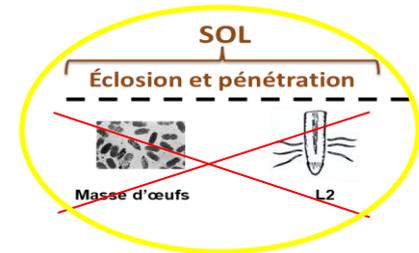


2/ Plantes naturellement riches en composés soufrés: *Alliaceae*



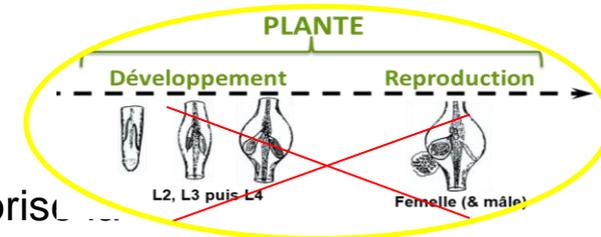
1/ Biofumigation: libération d'isothiocyanates (ITCs) nématocides après enfouissement et décomposition dans le sol

(le principal composant du Dazomet -> Methyl-ITC dans le sol)



2/ Plantes-piège mauvais-hôtes? Hiver: nématodes peu actifs

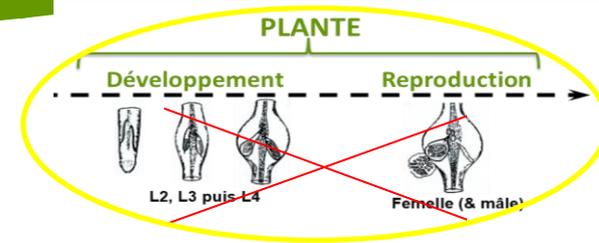
3/ Effet indirect: ajout de matière organique et d'azote: favorise la croissance des racines, favorise les prédateurs naturels, améliore le sol



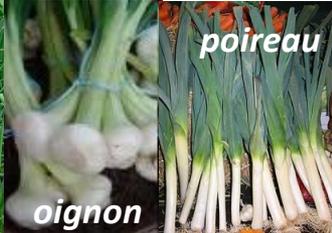
Pas encore d'essai probant

8. Diversification des cultures, rotation pour 'évitement'

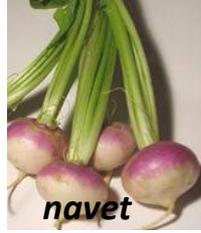
Eviter les succession de cultures très sensibles, casser le cycle avec des **cultures non-hôtes ou mauvais-hôtes** = plantes de coupure



Liliaceae



Brassicaceae



Apiaceae



Valerianaceae



Rosaceae

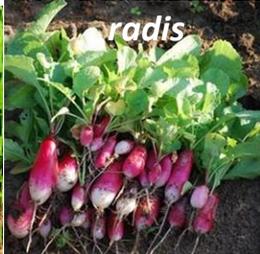


M. incognita,
M. arenaria

Liliaceae



Brassicaceae



Chénopodiaceae

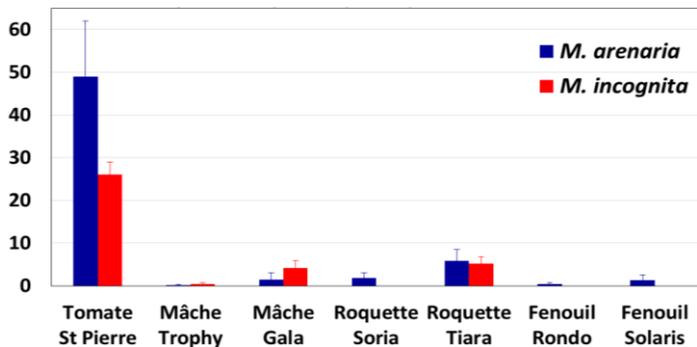


M. hapla

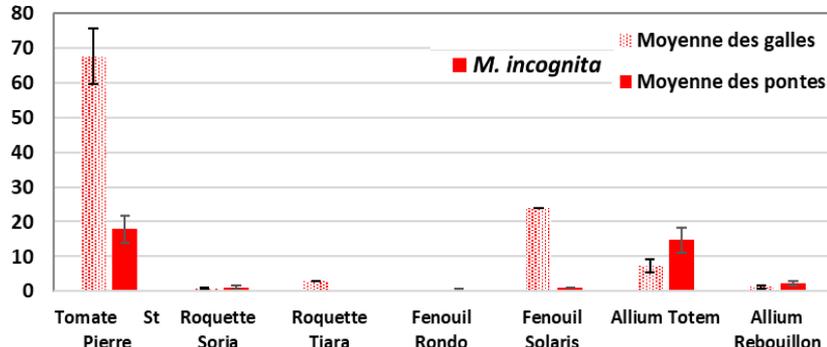
Hôte de *M. hapla*

**Dépend des genres
et espèces de
nématodes!**

Nombre de pontes / plant (7 sem à 16°C inoc 2000 œufs)



Nombre de galles et pontes / plant (5 sem à 24°C inoc 2000 œufs)



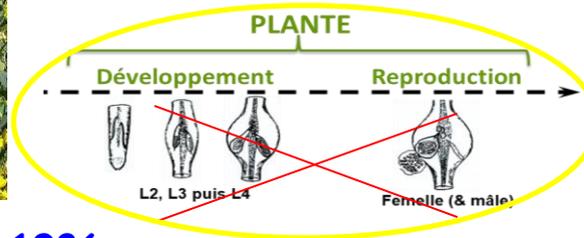
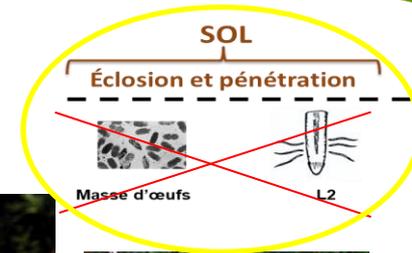
Et des variétés!

**Essais GONEM
2020 et 2021 en
conditions
contrôlées**

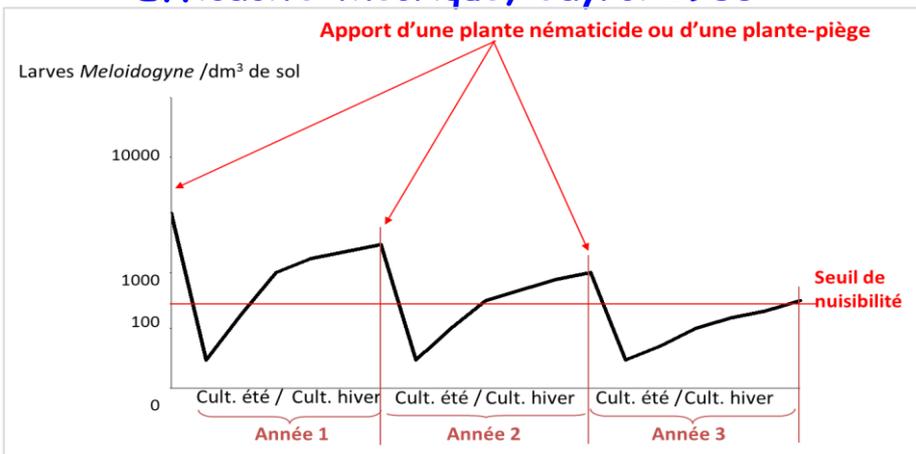
9. Plantes de service compagnes

Plantes nématicides (exsudats toxiques/œufs, larves)

Plantes pièges



Effacité théorique, Cayrol 1986



Peu de données fiables, dépend des variétés
 Modalités d'utilisation? Éviter les
 compétitions racinaires avec culture
 Recherche en cours (GONEM + thèse CIFRE
 INRAE/LIDEA 2021-2024 + projet PPR 'Cap Zero
 Phyto 2021-2026')



Djian-Caporalino et al, Biopesticides d'origine végétale : potentialités phytosanitaires. Lavoisier 2008

Hors Série Infos CTIFL «Plantes de service contre bioagresseurs» 2020 et Ouvrage QUAE «Plantes de service» en cours

Des méthodes à combiner pour une gestion durable des nématodes: GEDUNEM, GONEM

*pas de méthode simple,
universelle et durable*

