

# Microbiote, interactions bactéries-truffes et arômes des truffes



**Aurélie DEVEAU**

INRAE Nancy Grand Est  
aurelie.deveau@inrae.fr



# Aperçu

1. Quelques définitions et généralités sur le microbiote, les bactéries et les champignons
2. Le microbiote des truffes
3. Bactéries et mycorrhization
4. Bactéries et truffes
5. Des arômes et des bactéries

# Microbiome et microbiote

Définitions : ensemble des micro-organismes vivant dans un environnement / habitat donné (micro[biome] = environnement dans lequel vivent les micro-organismes)

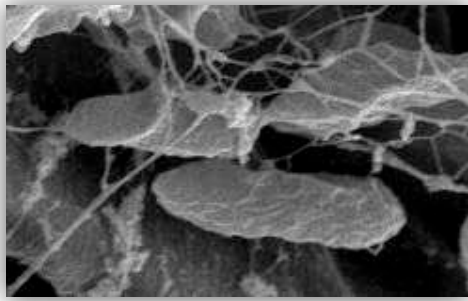
Exemples : microbiote intestinal, microbiote racinaire, du fromage ...

Synonymes : flore microbienne, micro-flore, communautés microbiennes

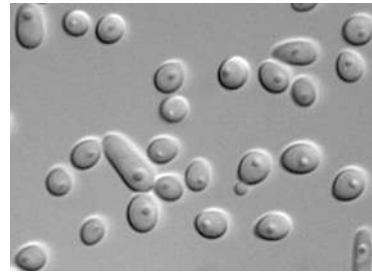
# Microbiome et microbiote

Qui sont les micro-organismes qui forment les microbiotes ?

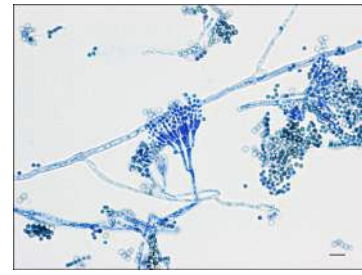
## Les bactéries



## Les champignons



*levures*



*champignons  
filamenteux*

## Les nématodes



## Les arthropodes



## Les protistes

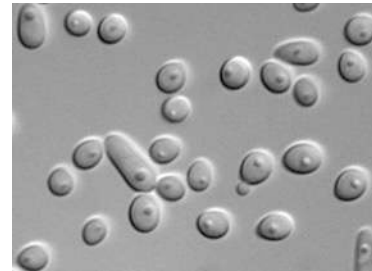


# Le microbiote des truffes

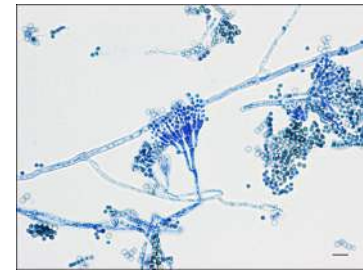
Les bactéries



Les champignons



*levures*



*champignons  
filamenteux*

# Bactéries et champignons jouent un rôle majeur sur Terre



**Nutrition et santé  
animale et humaine**

Nutrition et santé  
des cultures et des  
forêts

Agroalimentaire  
et  
Biotechnologies

Cycles biogéochimiques  
et protection  
de l'environnement

CHAMPIGNONS  
BACTERIES



# Les bactéries et les truffes



*T. magnatum*



*T. borchii*

**~ 1 million  
de bactéries cultivables  
par gramme de truffe**



*T. melanosporum*



*T. aestivum*



# Les bactéries et les truffes



*T. magnatum*



*T. borchii*

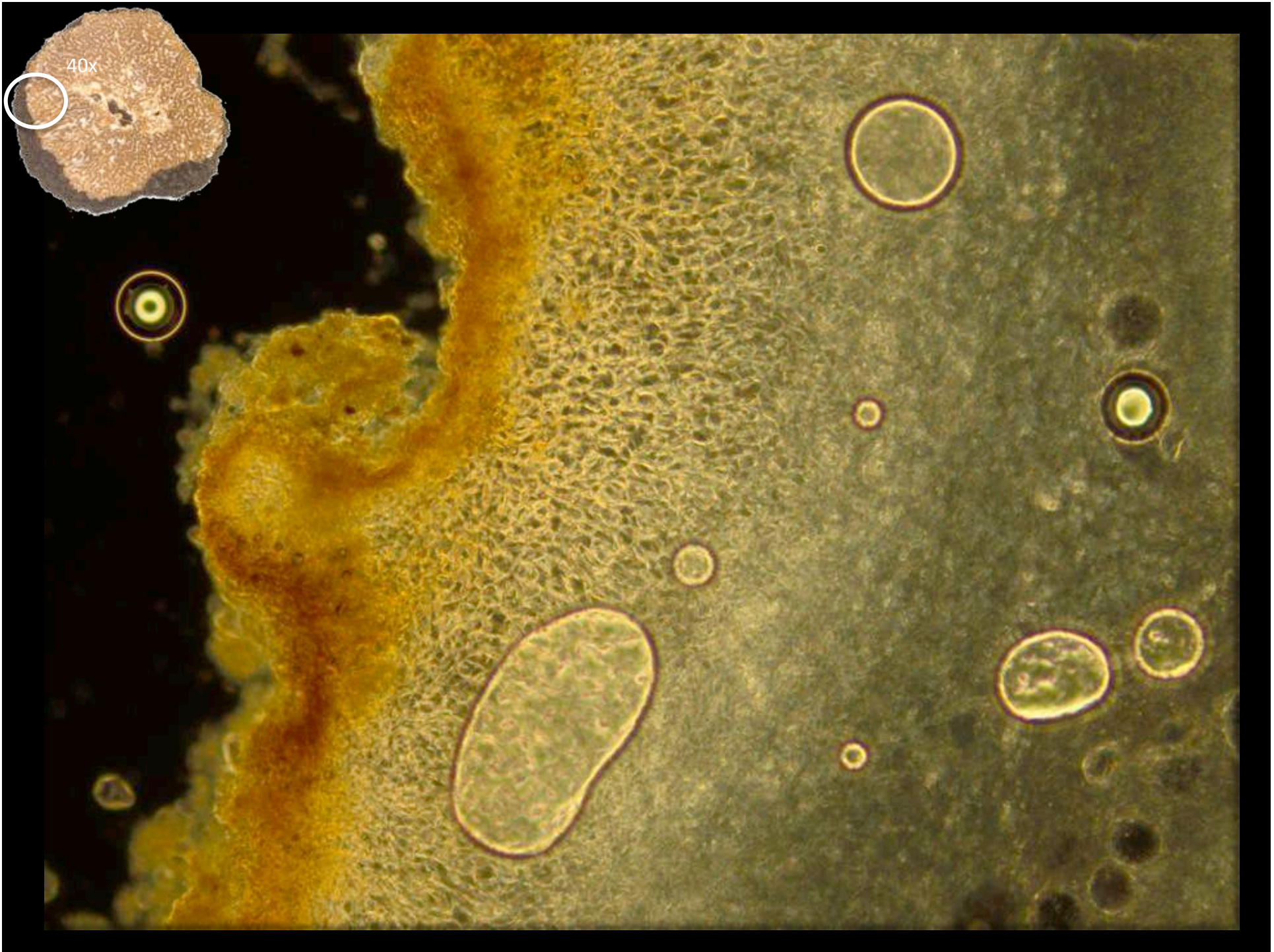
**~ 1 million  
de bactéries cultivables  
par gramme de truffe**



*T. aestivum*



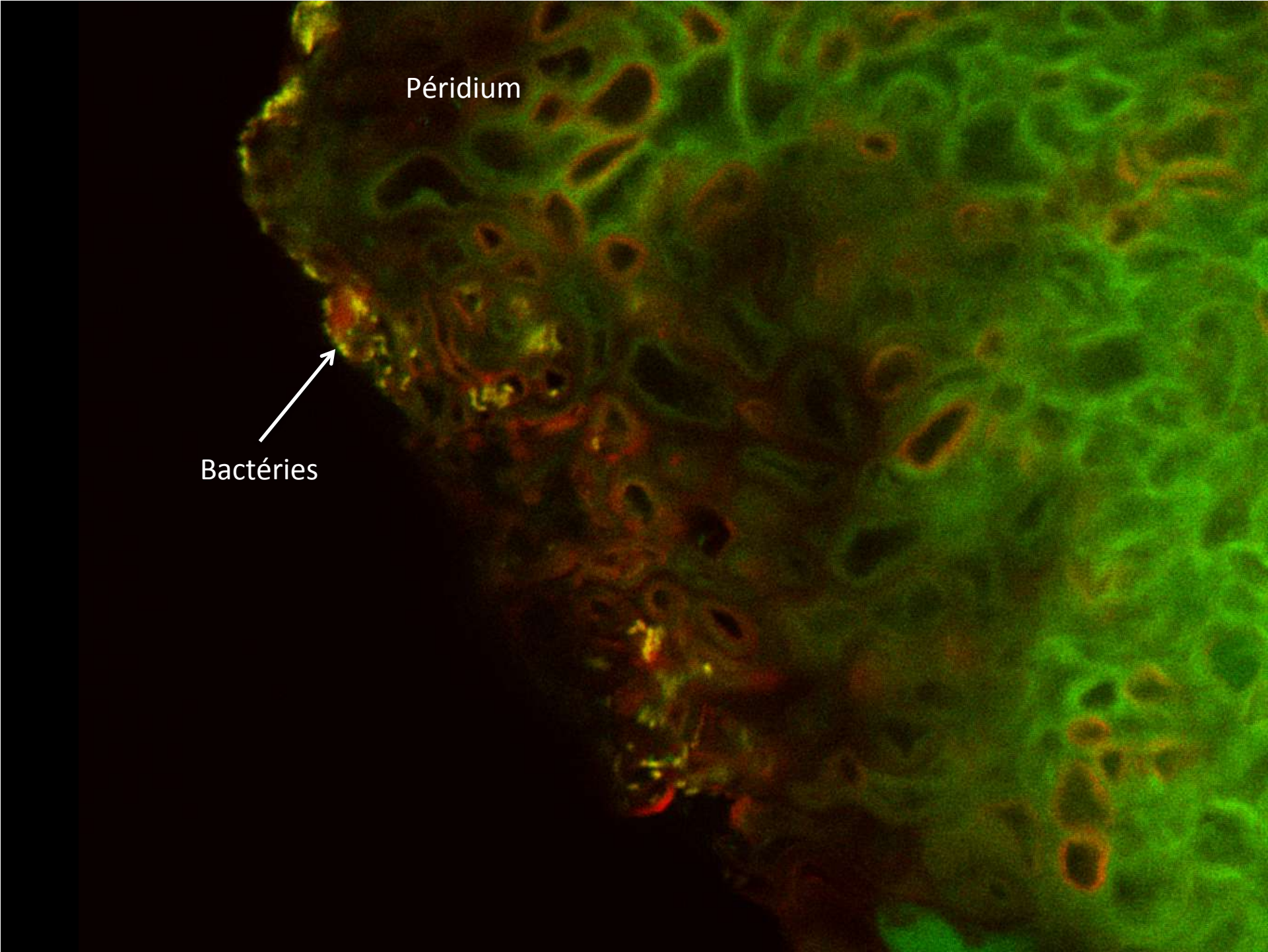
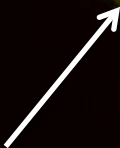
*T. melanosporum*





Péridium

Bactéries



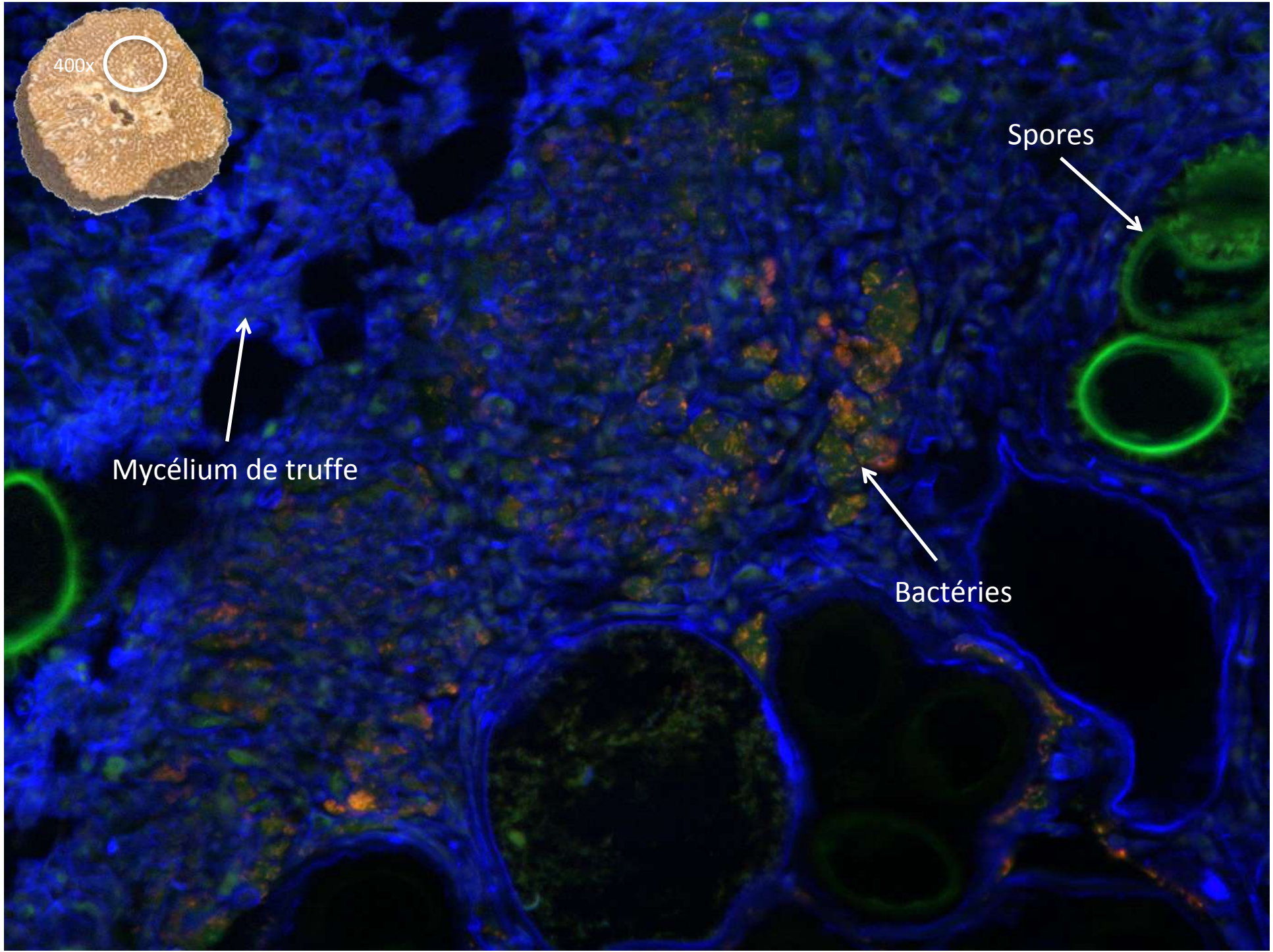




© Deveau INRA

© Deveau-INRA





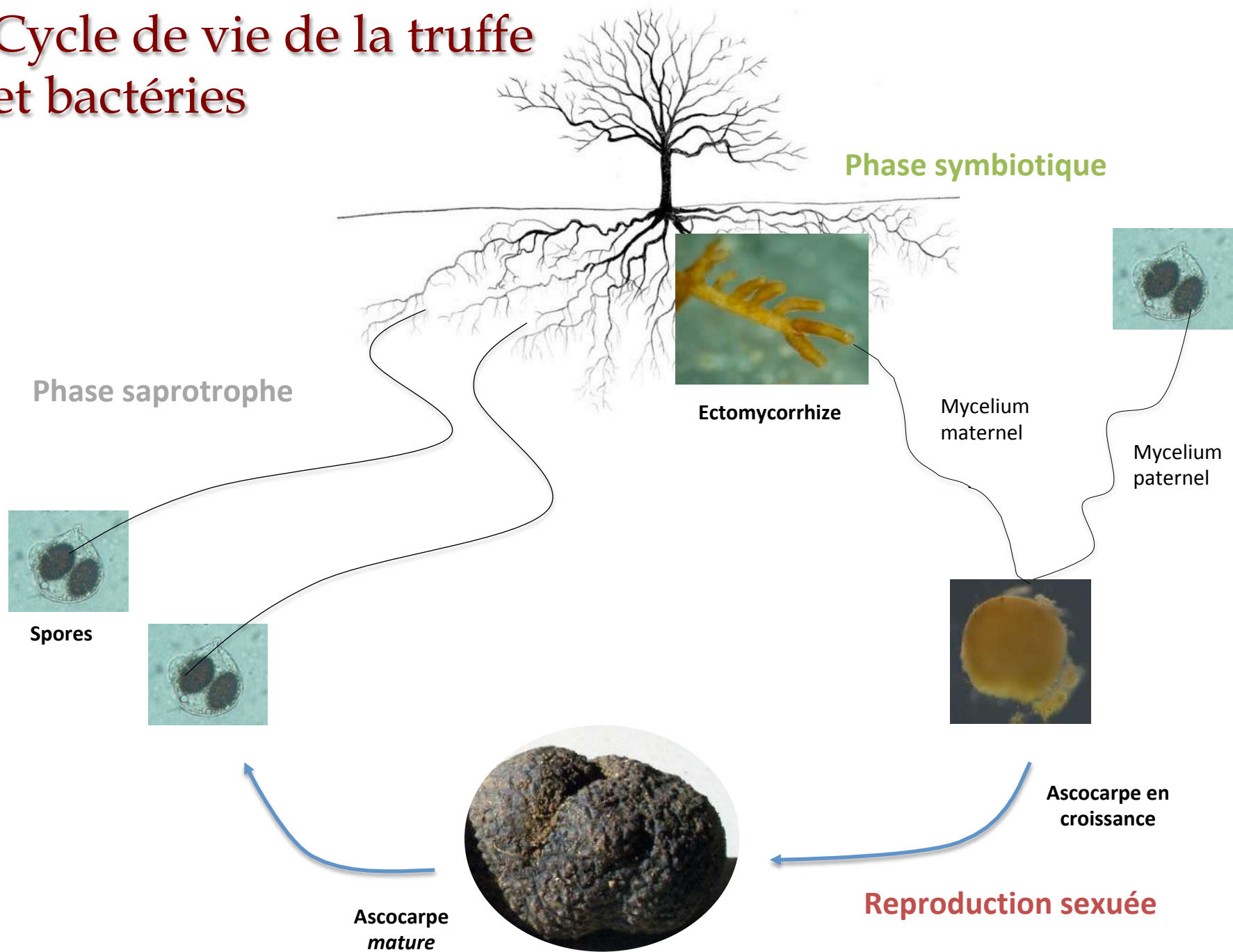
400x

Spores

Mycélium de truffe

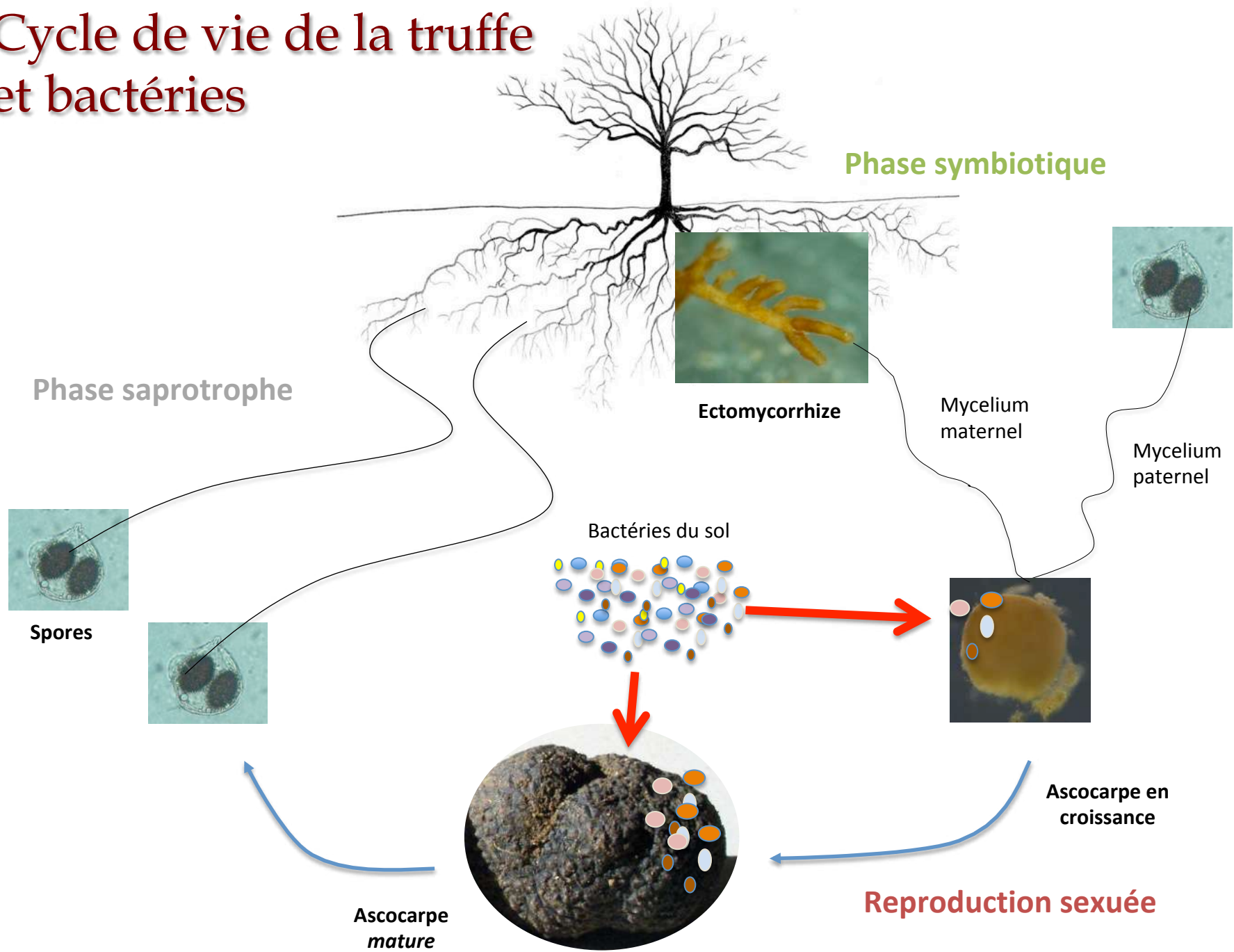
Bactéries

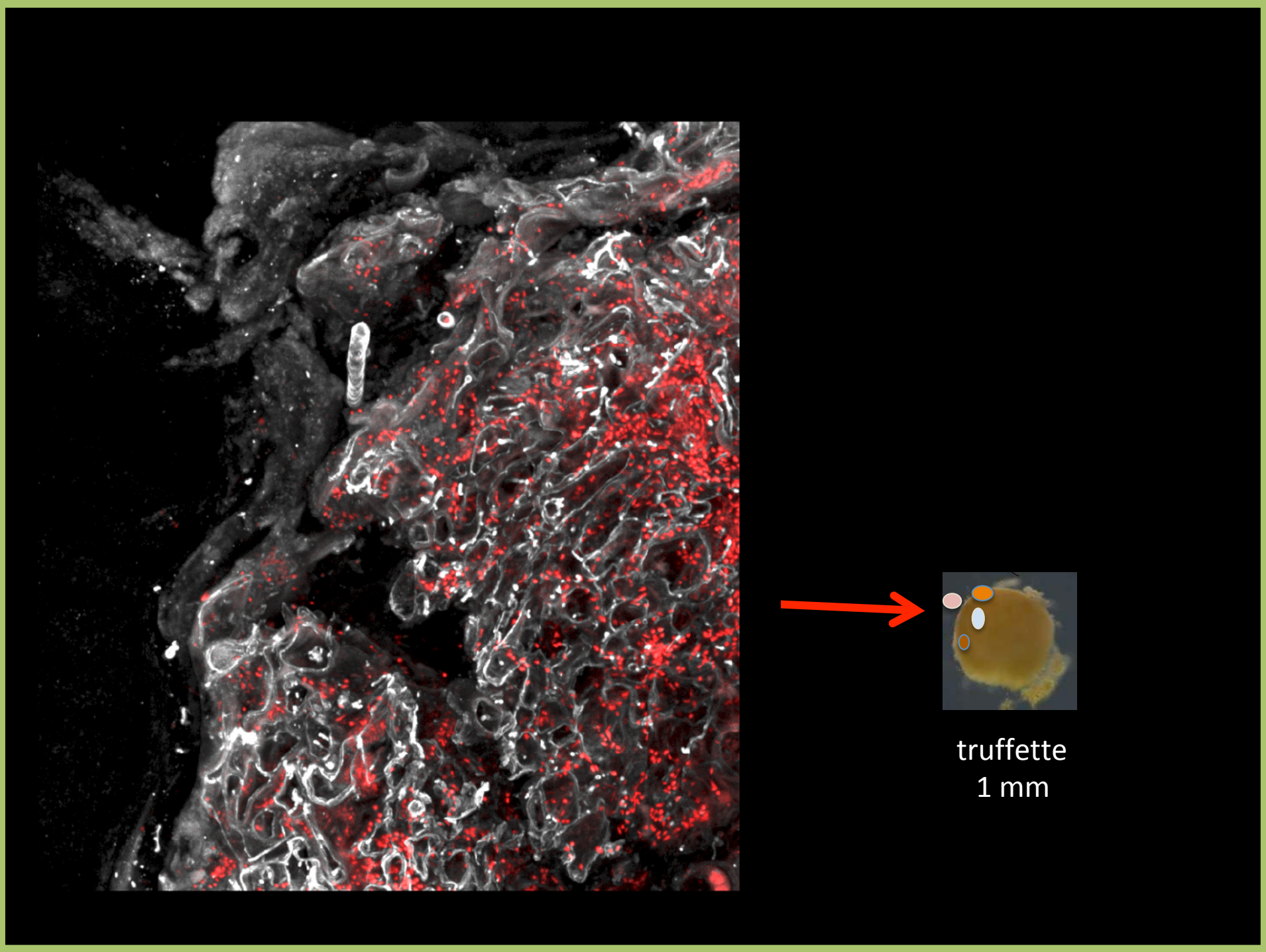
# Cycle de vie de la truffe et bactéries





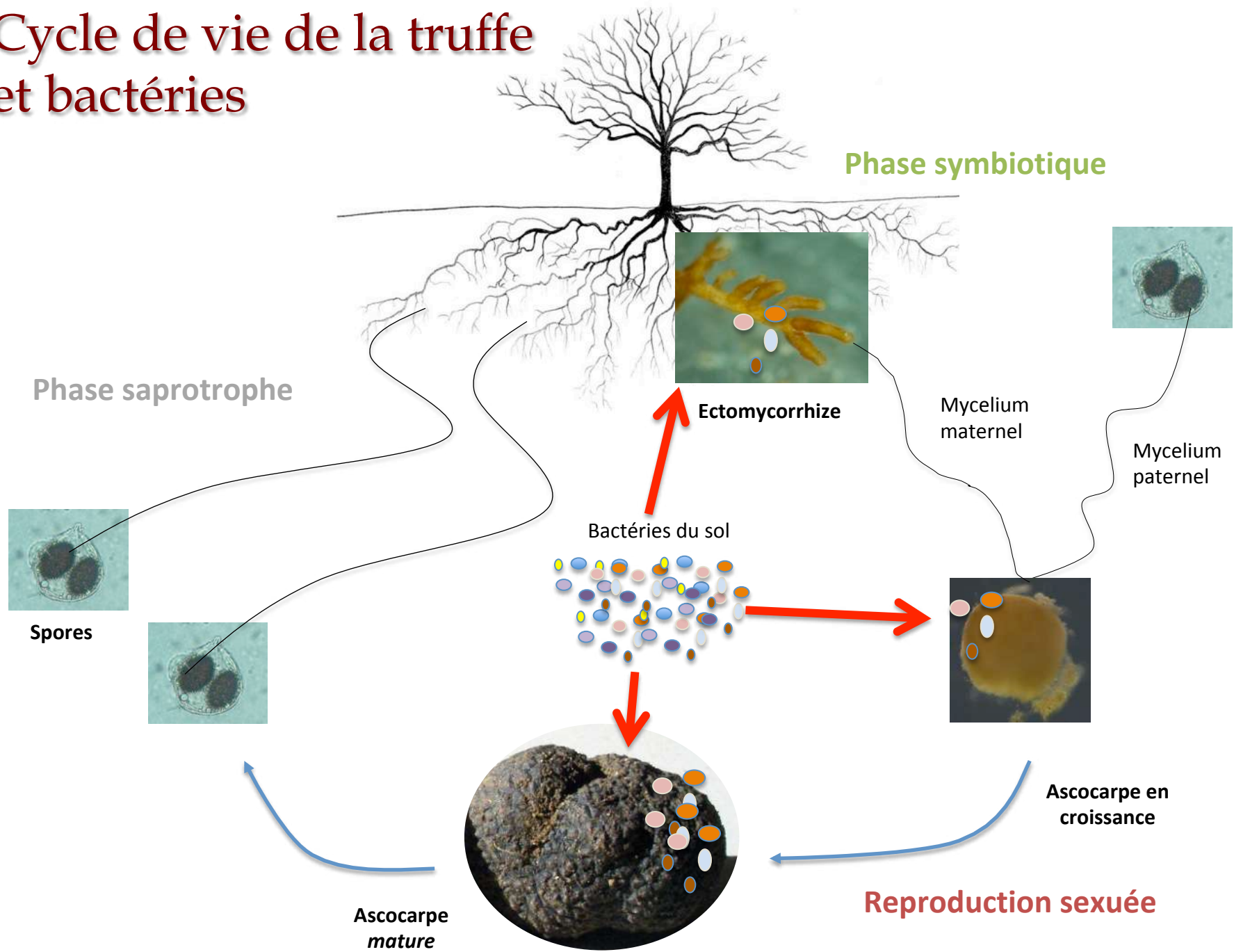
# Cycle de vie de la truffe et bactéries





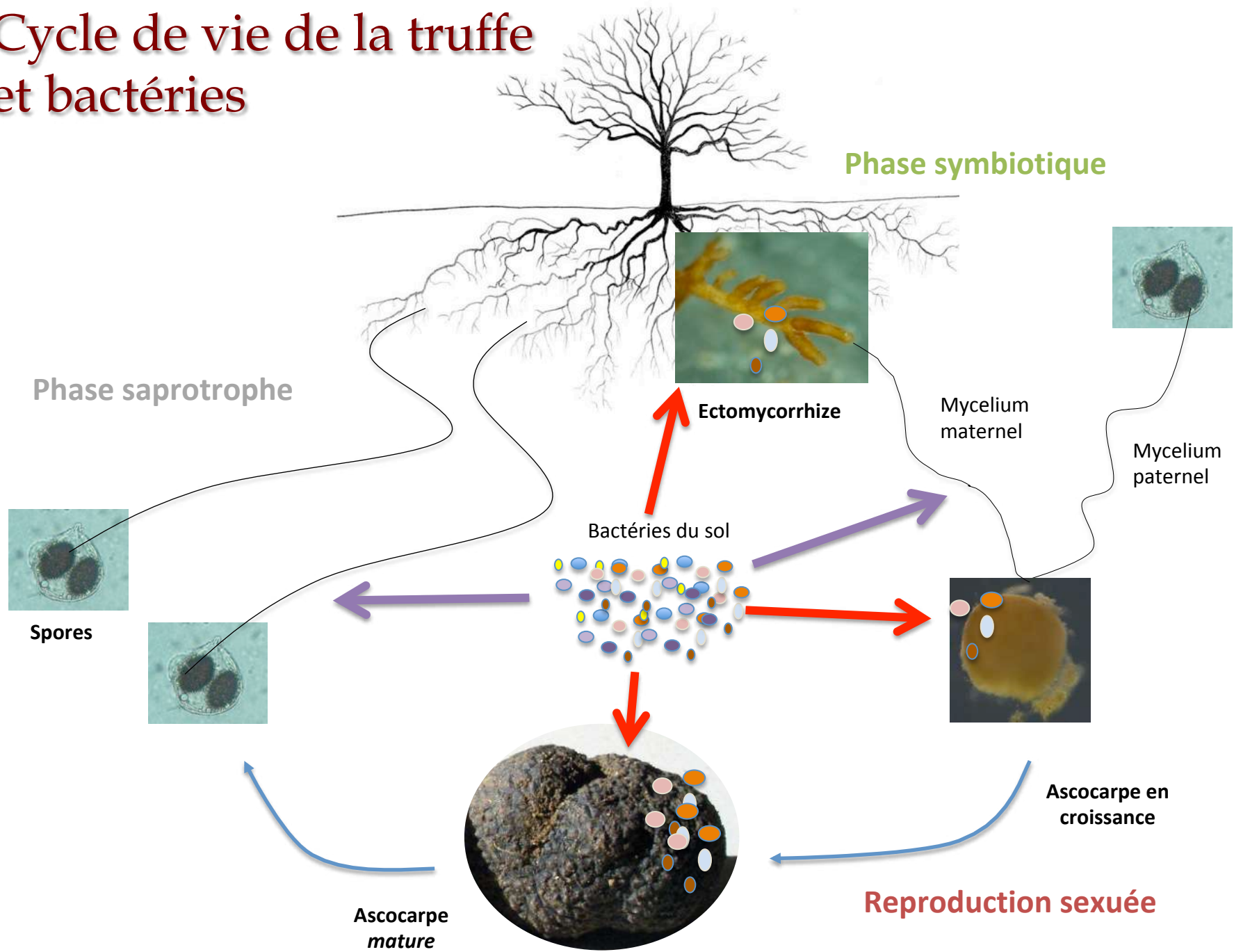
truffette  
1 mm

# Cycle de vie de la truffe et bactéries

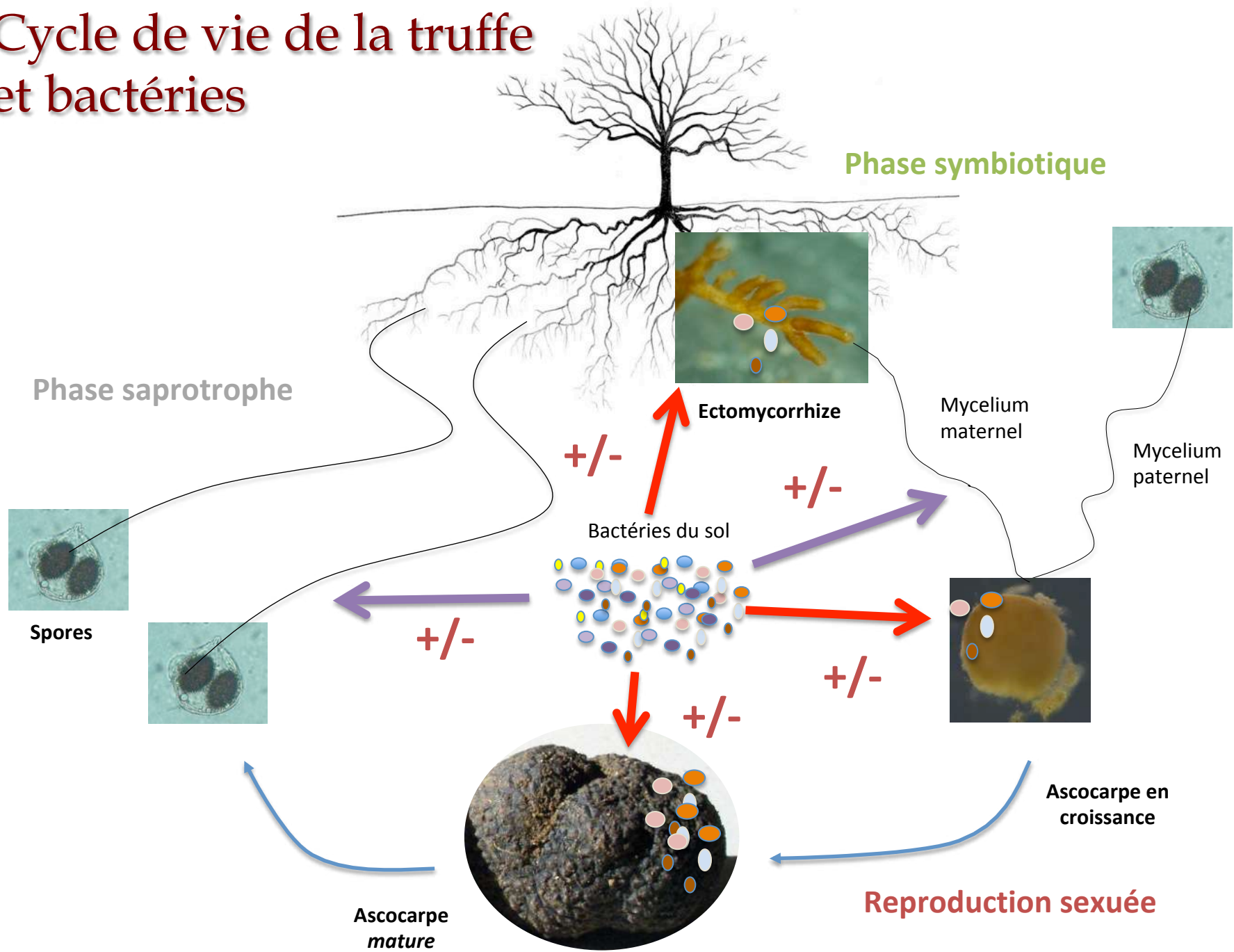




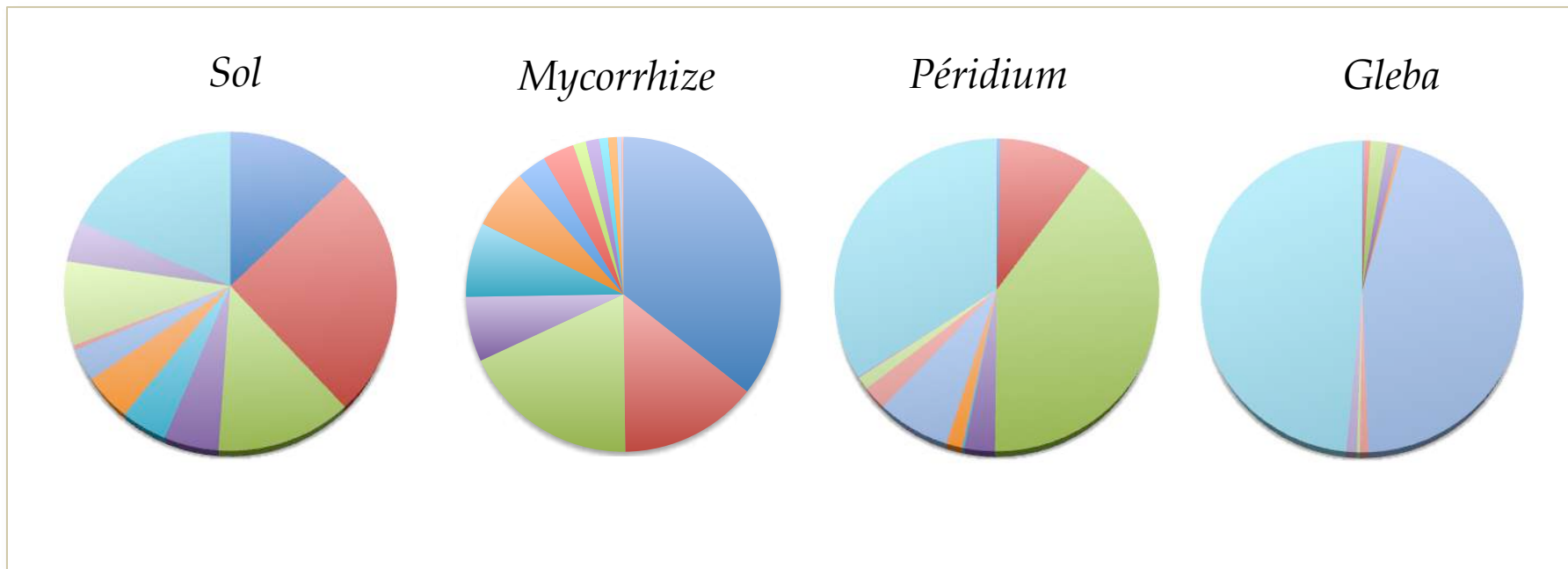
# Cycle de vie de la truffe et bactéries



# Cycle de vie de la truffe et bactéries



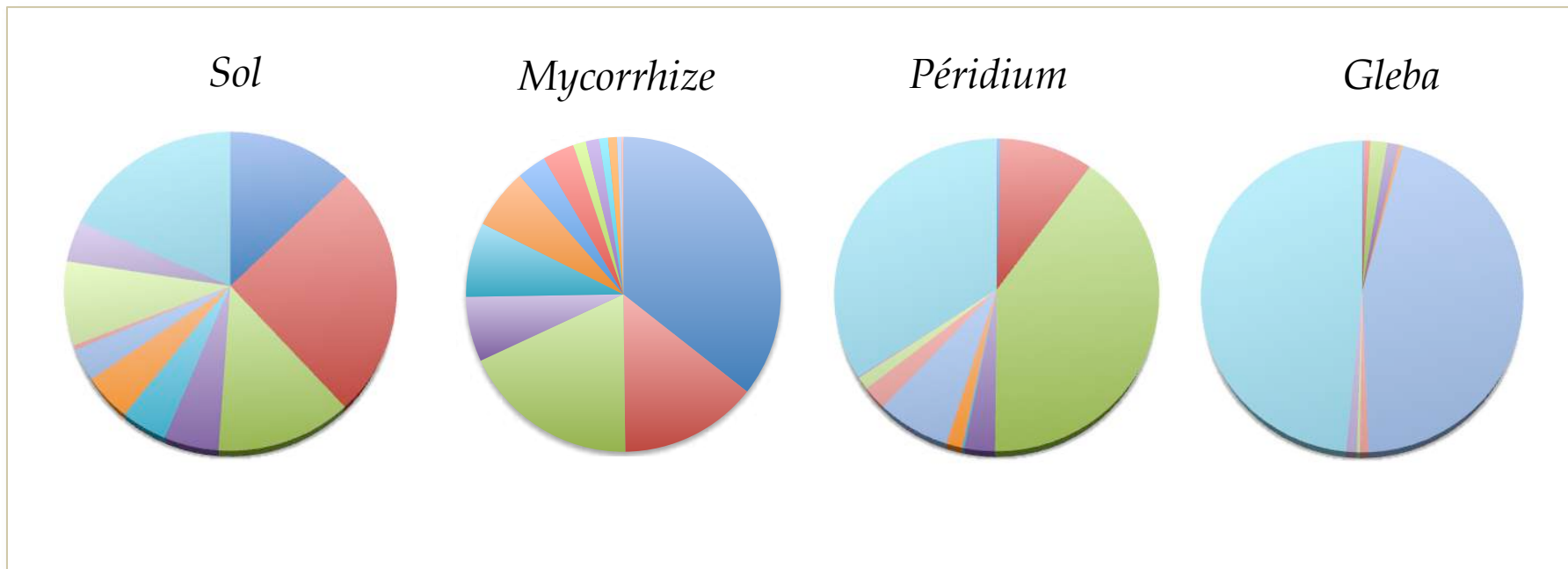
## Identité et diversité



*-> Des communautés différentes du sol et spécifique de chaque organe*

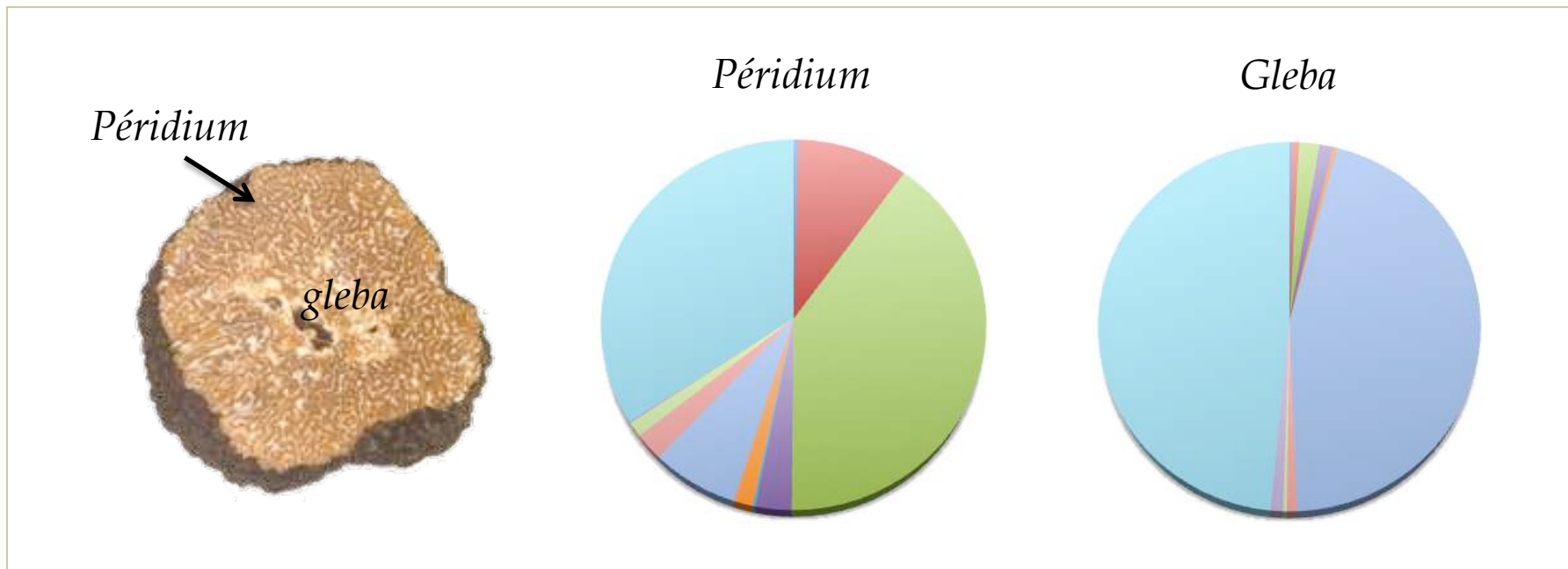


## Identité et diversité



*-> Un nombre restreint de groupes bactériens dans la truffe*

## Identité et diversité



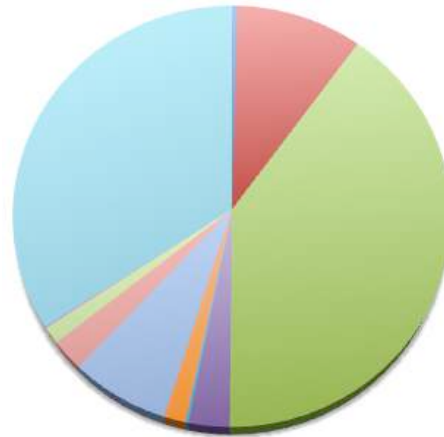
-> *Des communautés différentes à l'intérieur et en surface de la truffe*

## Identité et diversité

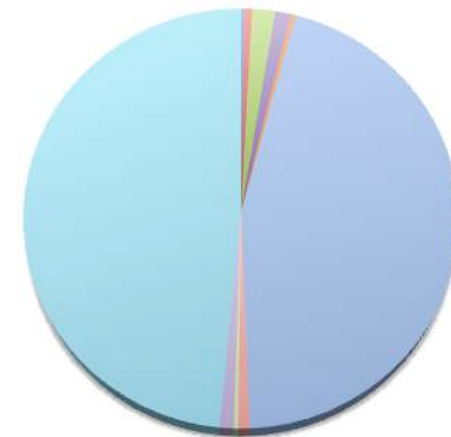
*Sol*



*Péridium*



*Gleba*



*-> Des communautés similaires dans la truffe de Bourgogne et dans une moindre mesure dans la truffe blanche d'Alba*

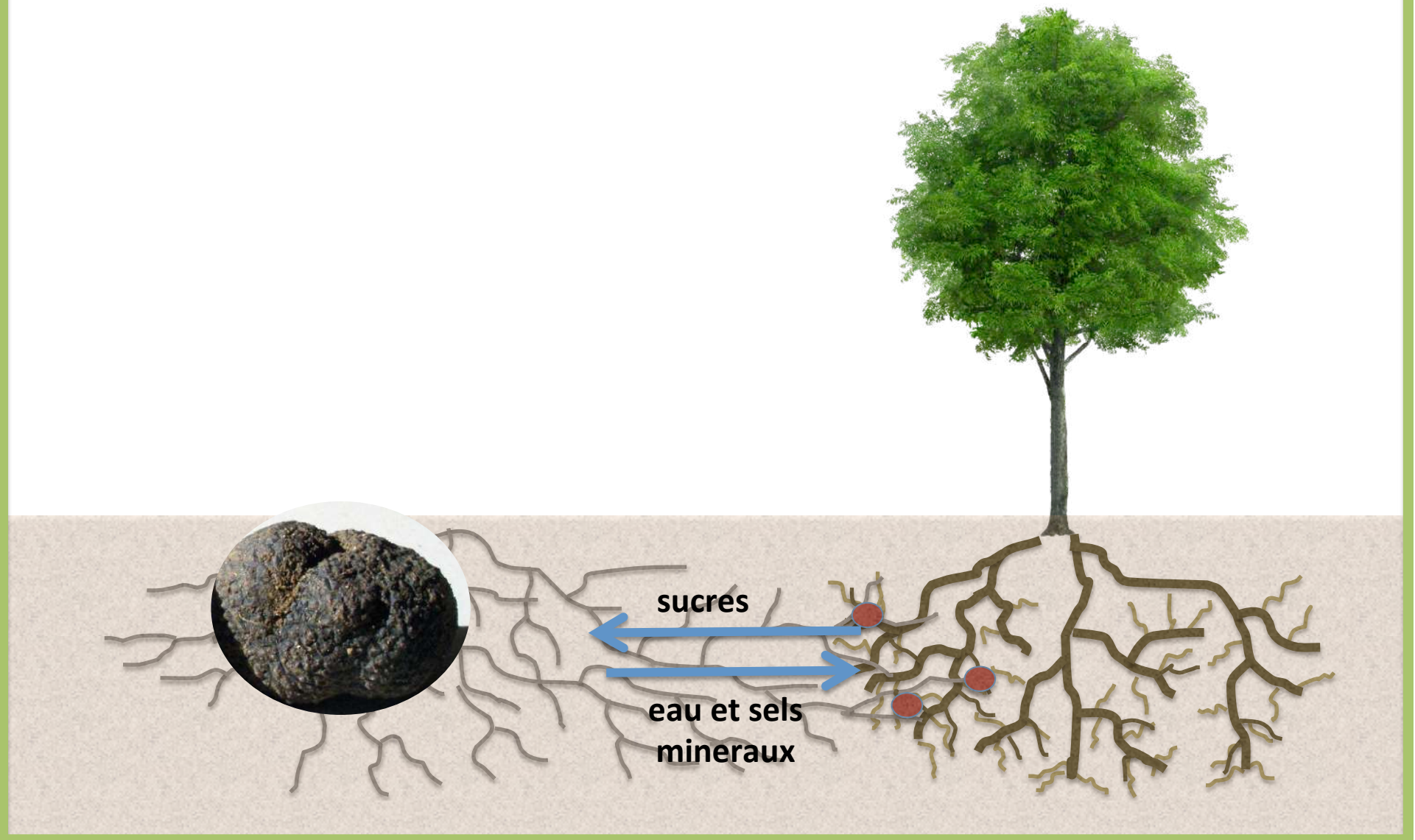
# Les communautés bactériennes des truffes

*En résumé:*

- *les truffes sont massivement colonisées par des bactéries à tous les stades de leurs vies (mycorrhizes, ascocarpe/truffe, mycélium)*
- *Les truffes sont colonisées par des espèces bactériennes spécifiques en comparaison d'autres environnements (sol ...)*

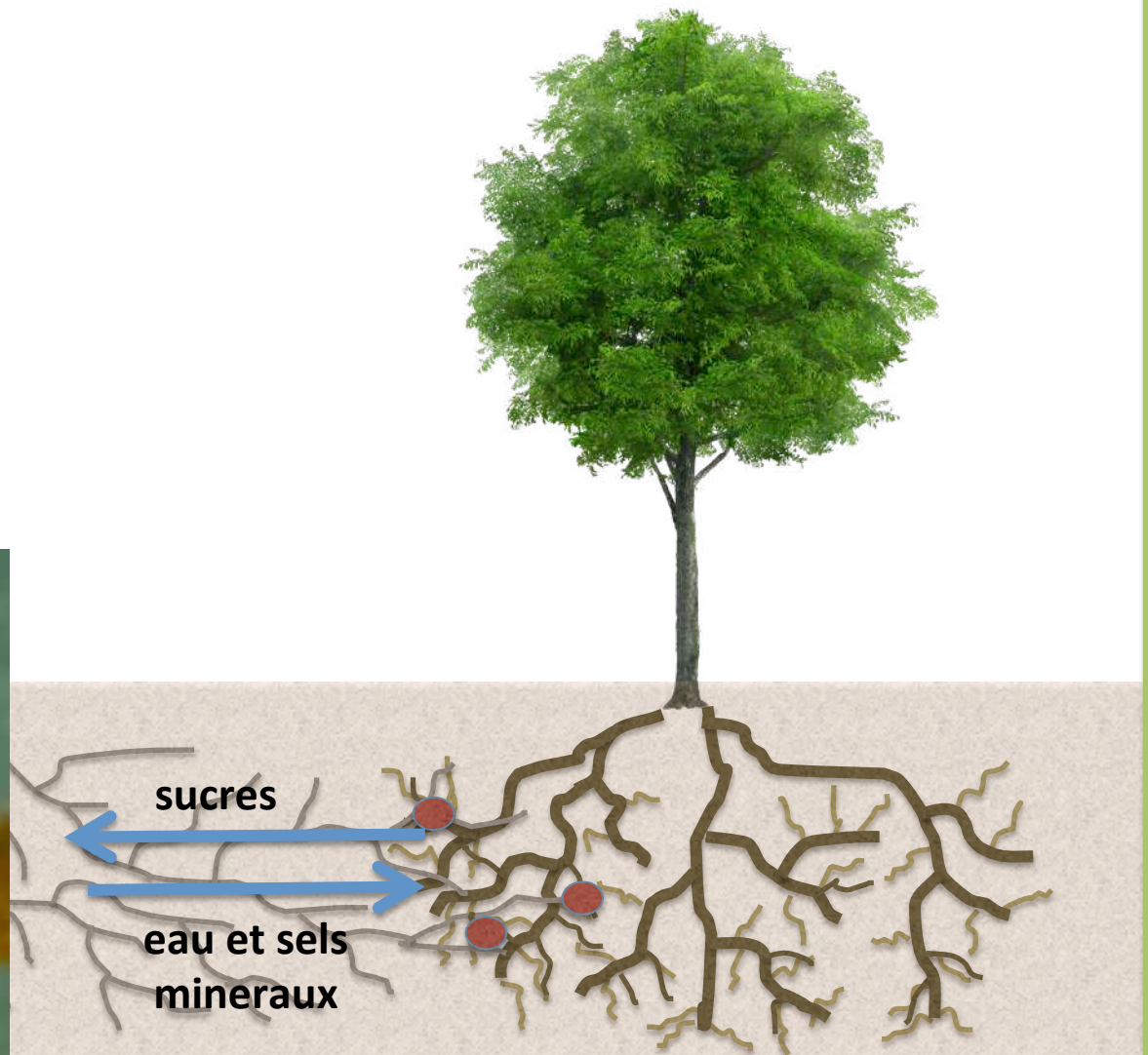
# Les bactéries auxiliaires de la mycorhization

# La symbiose ectomycorhizienne

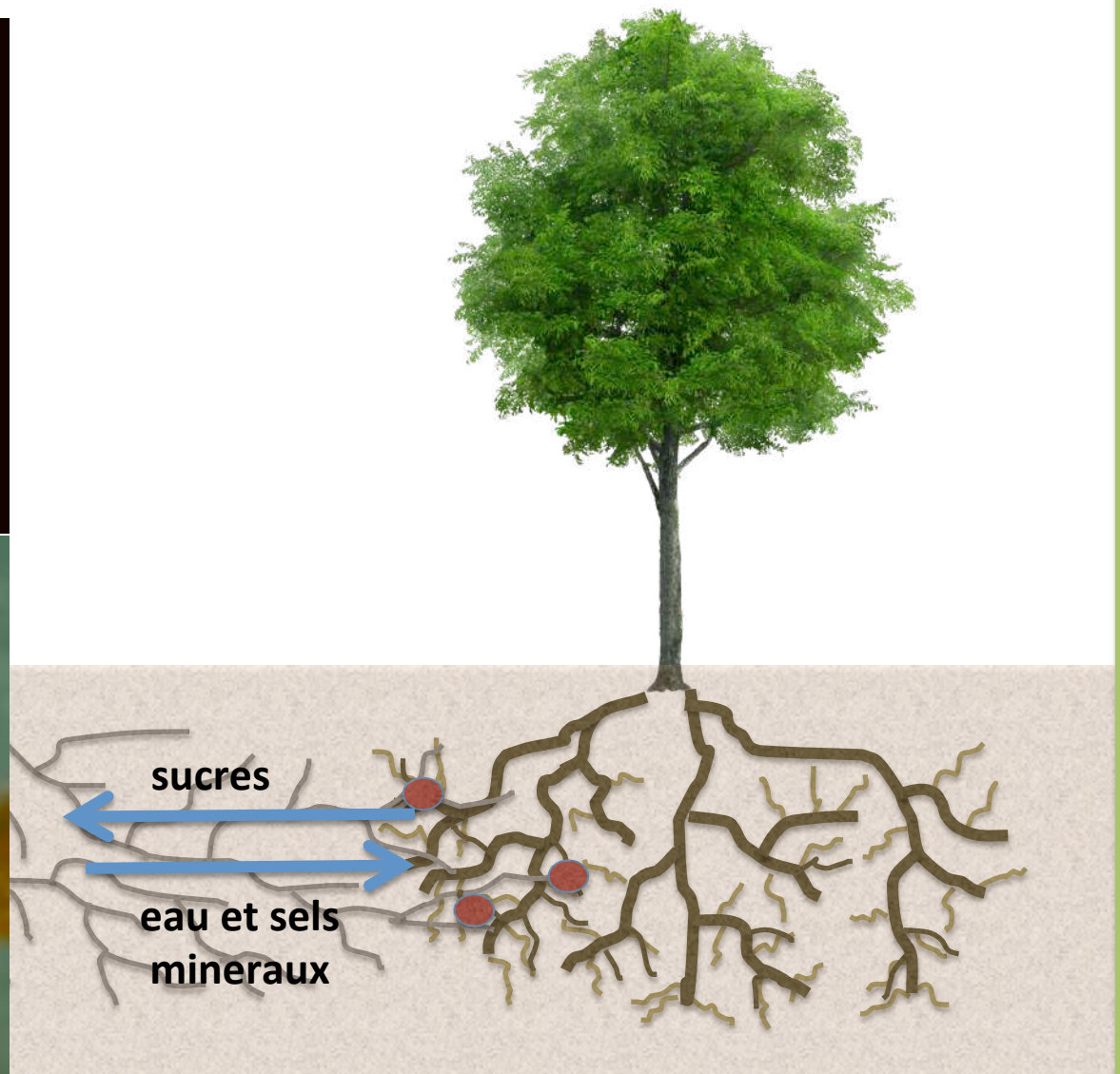
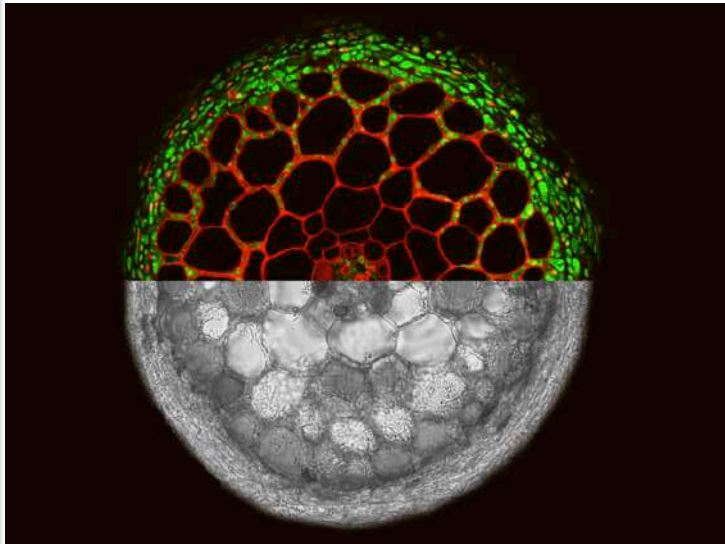




# La symbiose ectomycorhizienne



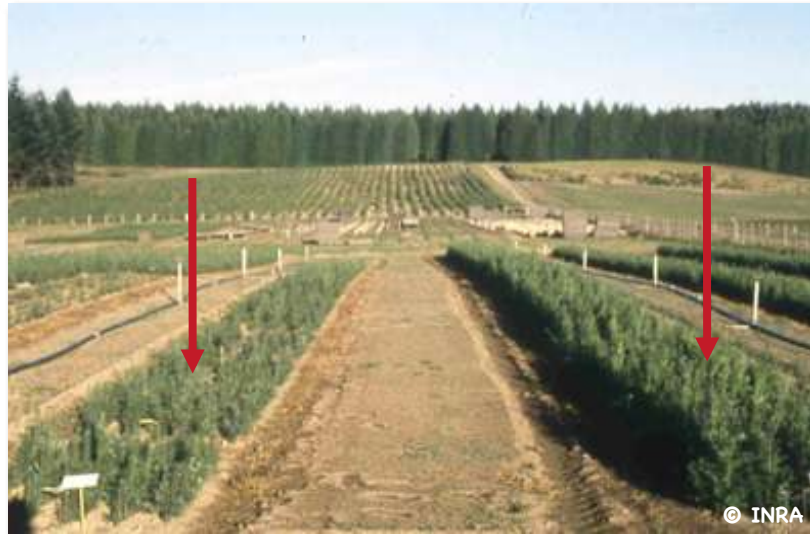
# La symbiose ectomycorhizienne



# Les bactéries auxiliares de la mycorhization

Non inoculé

Inoculé avec  
*Laccaria bicolor*



Pépinière de Peyrrat-Le-Château, France

Traitement	% de racines mycorrhisées		
	Pépinière 1	Pépinière 2	Pépinière 3
Champignon seul	60	43	83
Champignon + bactéries	87 *	83 *	99 *

Duponnois & Garbaye (1991)

# Les bactéries auxiliares de la mycorhization

Non inoculé                      Inoculé avec  
Laccaria bicolor



Pépinière de Peyrrat-Le-Château, France

Traitement	% de racines mycorrhisées		
	Pépinière 1	Pépinière 2	Pépinière 3
Champignon seul	60	43	83
Champignon + bactéries	87 *	83 *	99 *

Duponnois & Garbaye (1991)

***T. melanosporum* – Pin d'Alep:**  
15,2 % -> 28 % (+ bactérie)

***T. melanosporum* – Chêne :**  
25,2 % -> 33,4 % (+ bactérie)

# Les bactéries auxiliaires de la mycorhization

*En résumé :*

- *certaines bactéries stimulent la formation de mycorhizes par différentes espèces de truffes (en serre)*
- *Pas de travaux en truffières sur le long terme*

# Les bactéries et la truffe



# Les bactéries et la truffe

- Pourquoi cette colonisation massive ?
- Néfastes ? Bénéfiques ? Sans importance ?

# Les bactéries, néfastes, bénéfiques, neutres ?

## Trufficulteur

### Objectifs:

- ✓ Production de (beaucoup) de truffes
- ✓ Bon état
- ✓ Arômes plaisants et typiques

## Truffe

### Objectif = se reproduire abondamment

- ✓ Production de beaucoup de spores
- ✓ Spores à maturité
- ✓ Pas de maladie
- ✓ Arômes qui attirent les « agents de dispersion (sangliers...)
- ✓ Désagrégation de la truffe

## Les bactéries, néfastes, bénéfiques, neutres ?

1. Stimulation de la reproduction
2. La nutrition des truffes
3. Maladies
4. Décomposition des truffes et détérioration de l'arôme
5. Contribution à la formation de l'arôme

# Des bactéries impliquées dans la fructification de champignons



Champignon de Paris



Pleurote

# Qu'en est-il des truffes ?



Mycelium  
maternel



Mycelium  
paternel



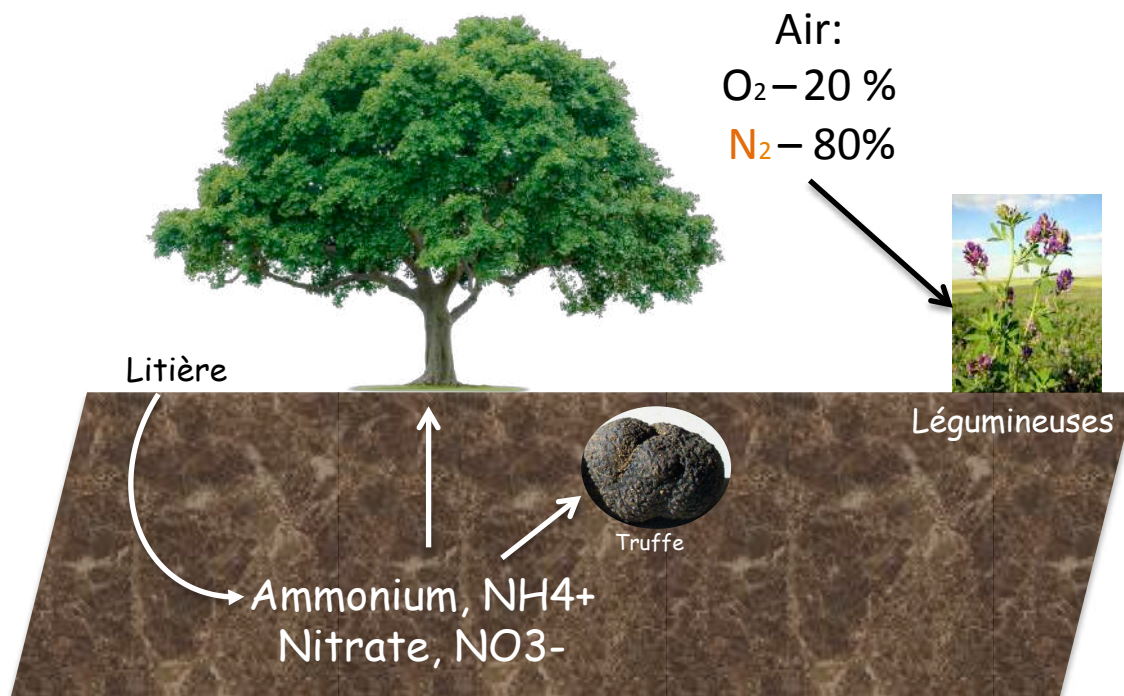
## Les bactéries, néfastes, bénéfiques, neutres ?

1. Stimulation de la reproduction ??
2. La nutrition des truffes
3. Maladies
4. Décomposition des truffes et détérioration de l'arôme
5. Contribution à la formation de l'arôme



# La nutrition des truffes

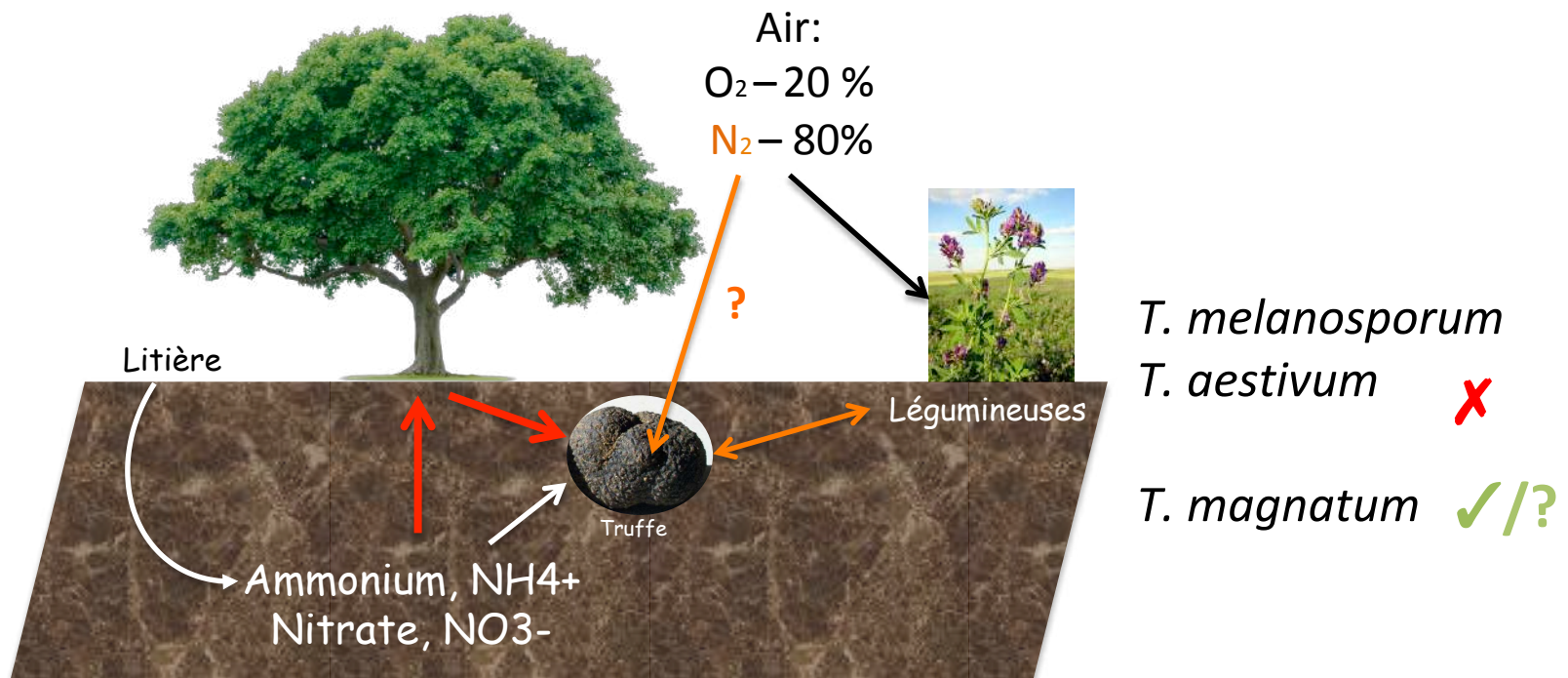
## L'azote, un élément indispensable au vivant





# La nutrition des truffes

## L'azote, un élément indispensable au vivant



## Les bactéries, néfastes, bénéfiques, neutres ?

1. Stimulation de la reproduction
2. La nutrition des truffes
3. Maladies
4. Décomposition des truffes et détérioration de l'arôme
5. Contribution à la formation de l'arôme



## Des bactéries à l'origine de maladies de champignons



## Des bactéries à l'origine de maladies de champignons ?

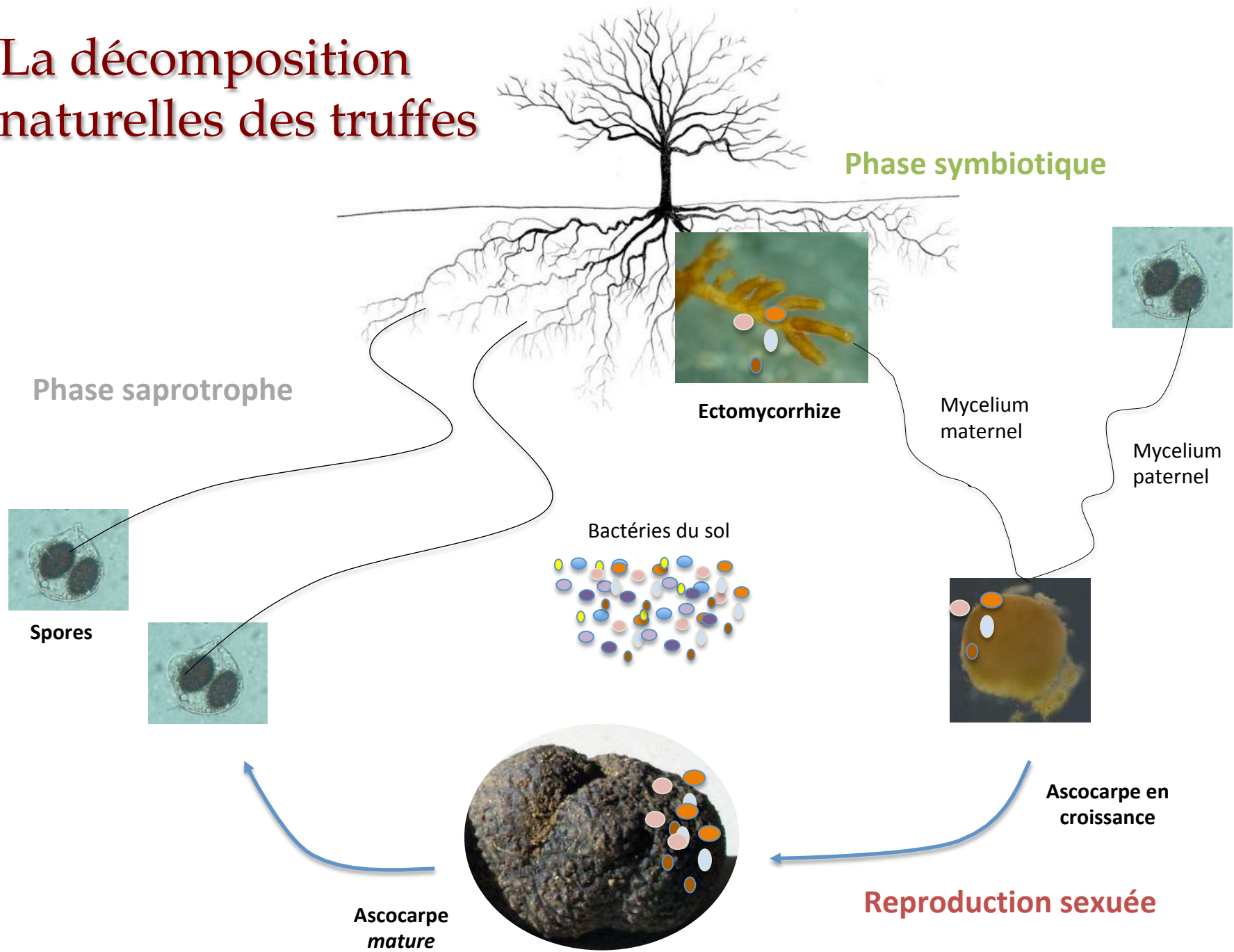


- Phénomènes de pourrissements (-30% production Australie 2010)
- Deux champignons identifiés : *Trichothecium crotocinigenum*  
*Acrostalagmus luteoalbum*
- Problèmes majeurs causés par les larves d'insectes et les insectes
- Programme de recherche en cours

## Les bactéries, néfastes, bénéfiques, neutres ?

1. Stimulation de la reproduction
2. La nutrition des truffes
3. Maladies
4. Décomposition des truffes et détérioration de l'arôme
5. Contribution à la formation de l'arôme

# La décomposition naturelles des truffes



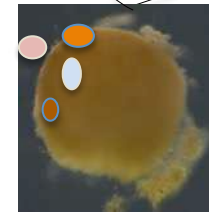
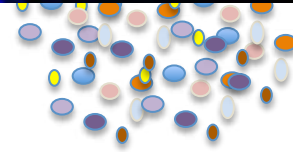
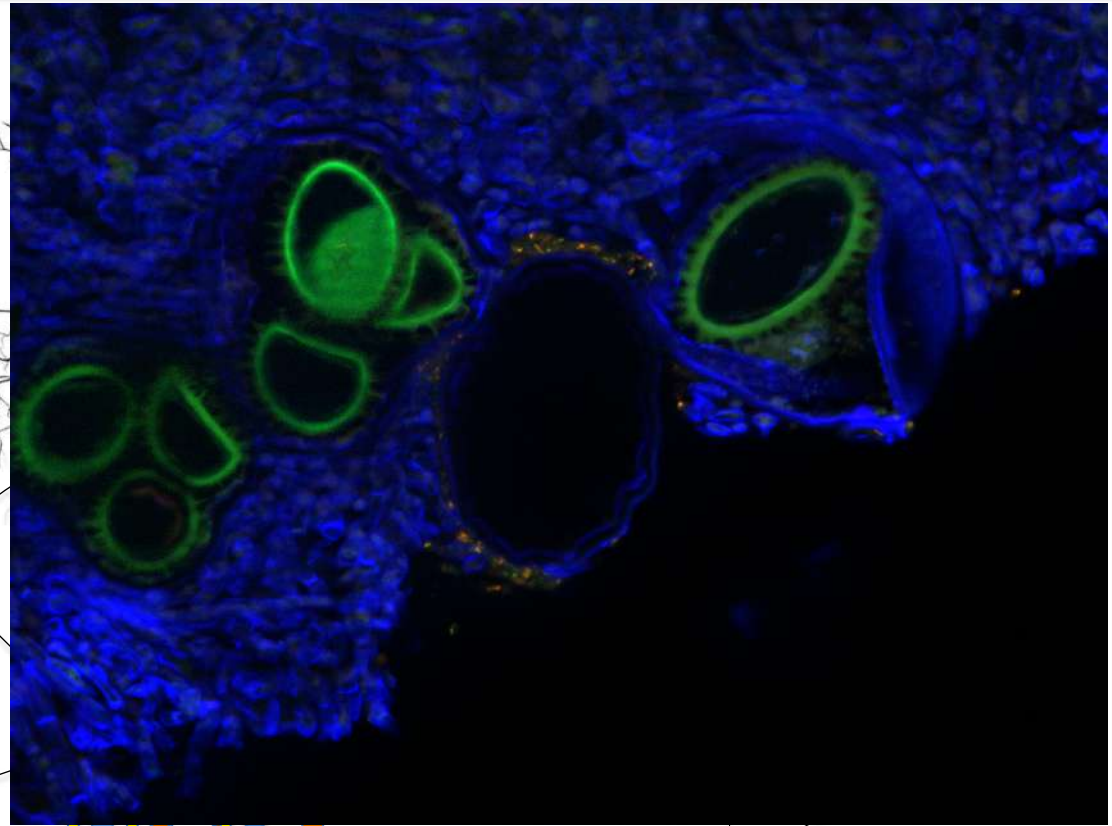


# La décomposition naturelles des truffes

Phase saprotrophe



Spores

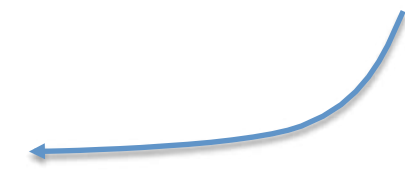
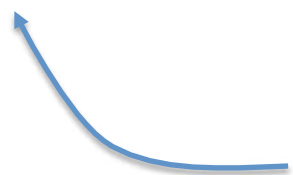


Ascocarpe en croissance

Reproduction sexuée



Ascocarpe *mature*



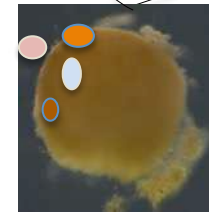
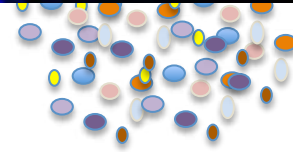
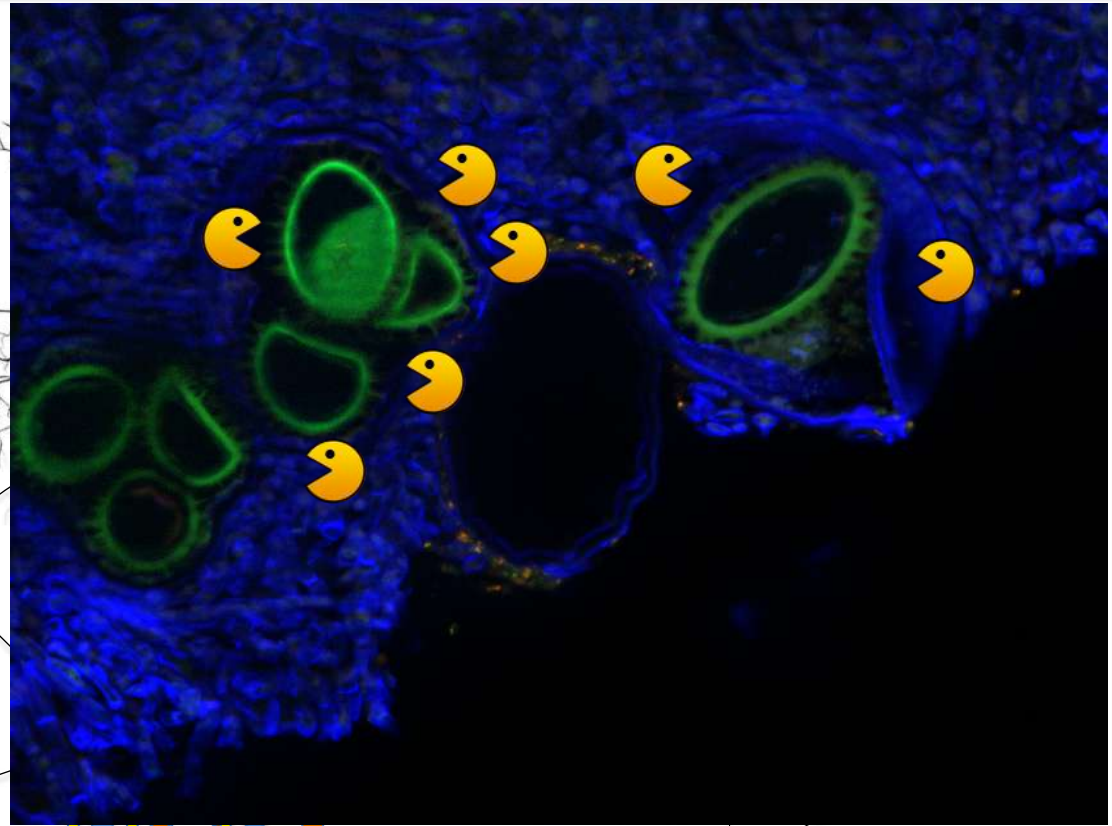


# La décomposition naturelles des truffes

Phase saprotrophe



Spores



Ascocarpe en croissance



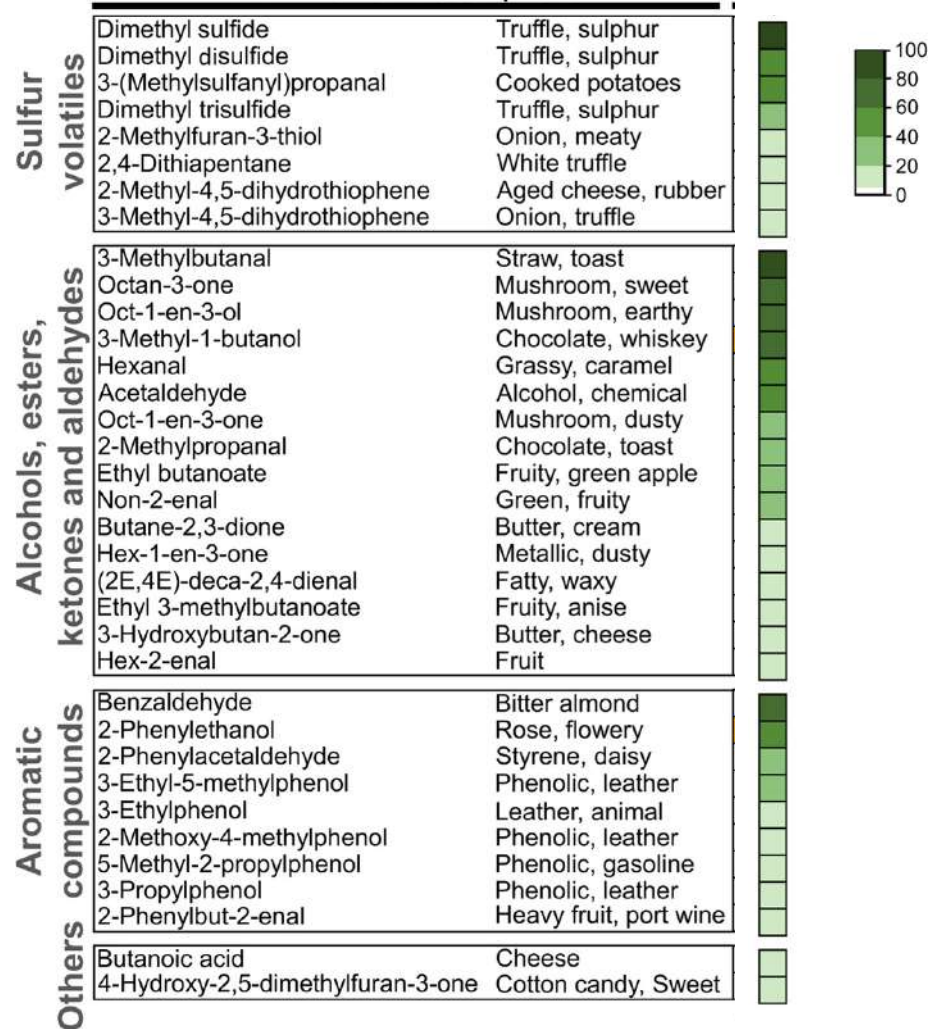
Ascocarpe *mature*

Reproduction sexuée

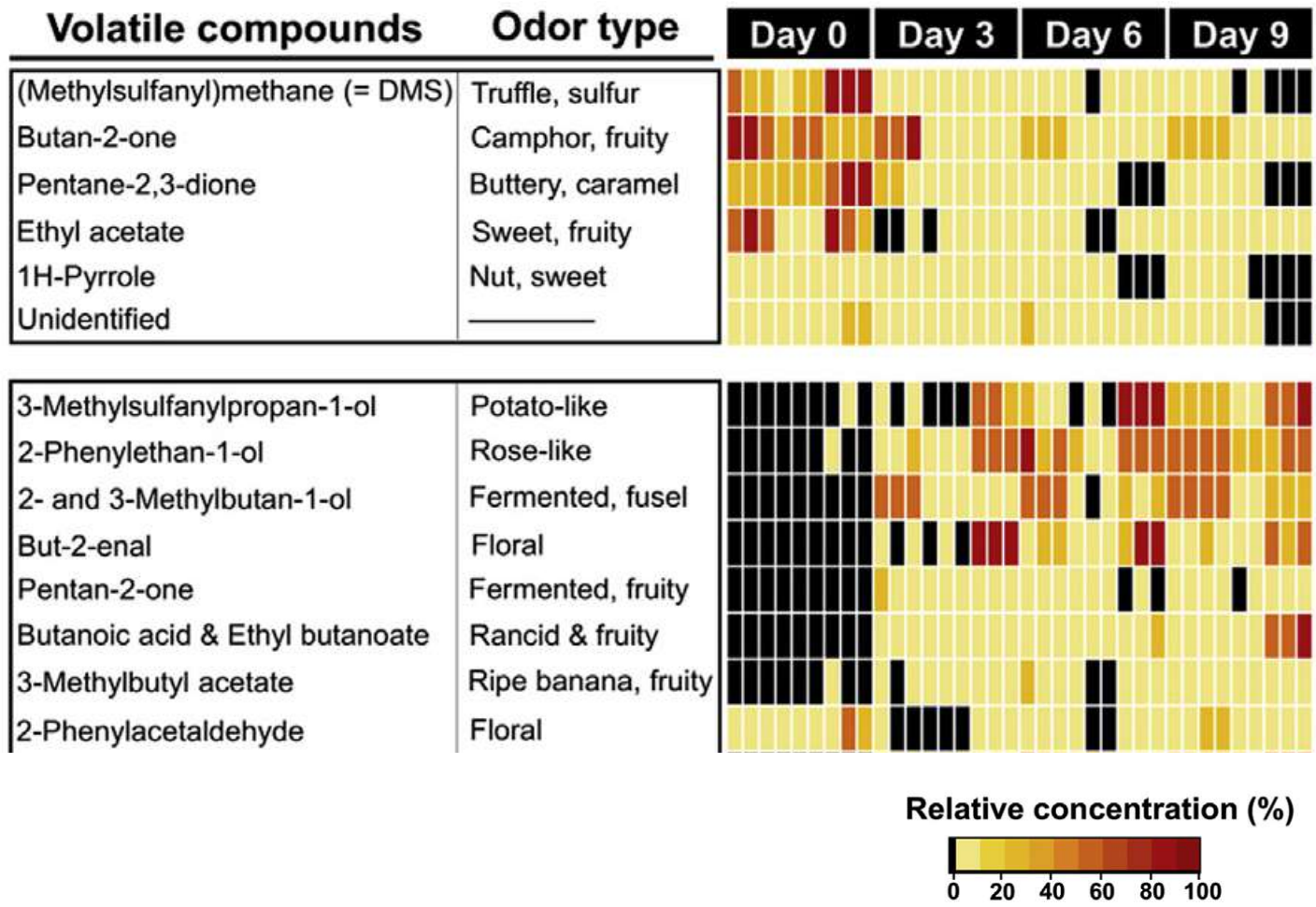
# Détérioration de l'arôme après récolte & bactéries

Odorants of Truffle Fruiting Bodies  
with Aroma Descriptors

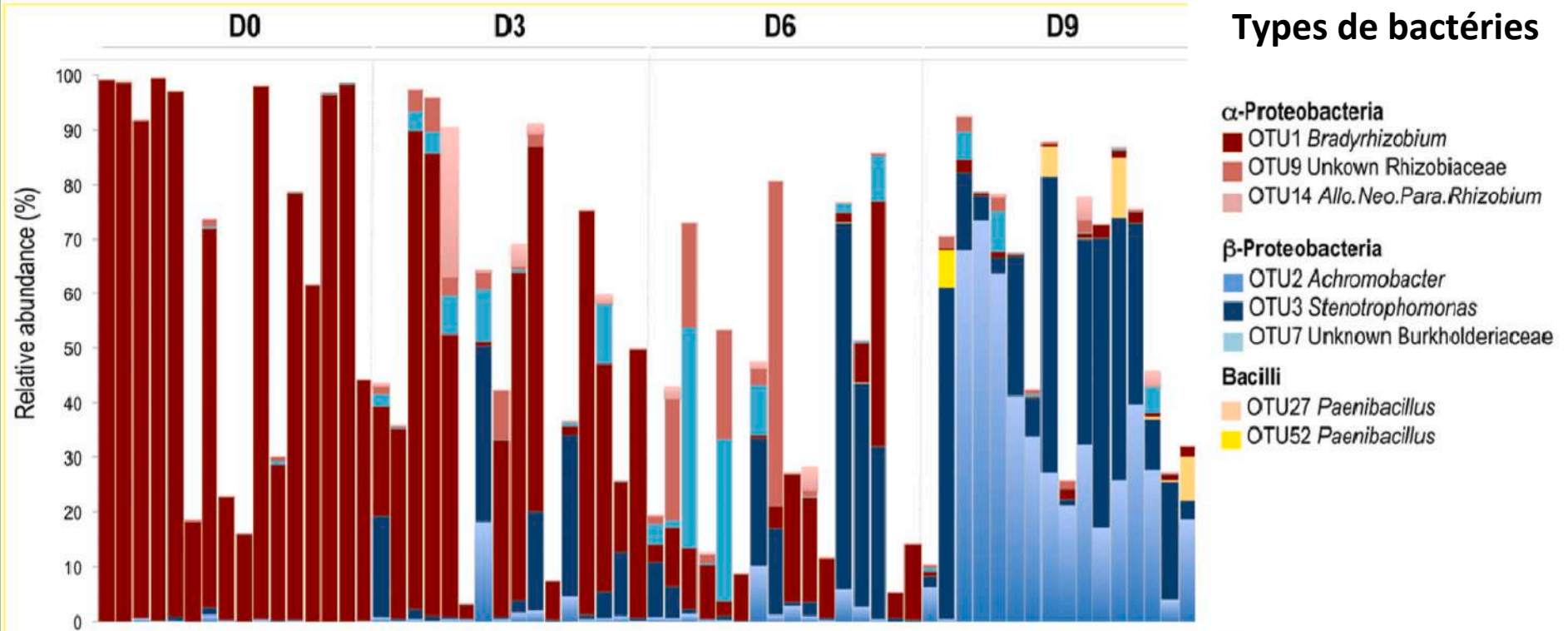
Fréquence



# Détérioration de l'arôme après récolte & bactéries

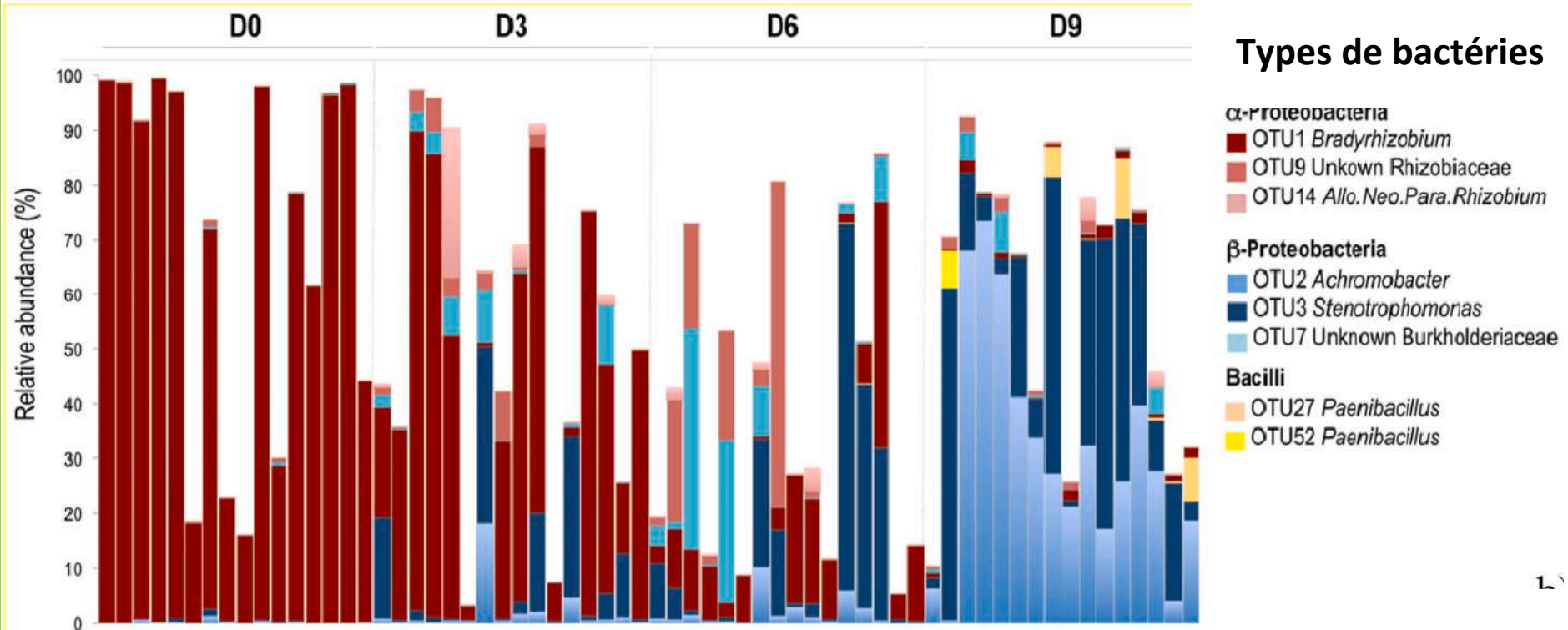


# Détérioration de l'arôme après récolte & bactéries





# Détérioration de l'arôme après récolte & bactéries



- Les bactéries typiques de la pourriture des aliments sont responsables de la transformation de l'arôme des truffes
- Les bactéries « natives » ne sont pas impliquées dans la dégradation de l'arôme



## Les bactéries, néfastes, bénéfiques, neutres ?

1. Stimulation de la reproduction
2. La nutrition des truffes
3. Maladies
4. Décomposition des truffes et détérioration de l'arôme
5. Contribution à la formation de l'arôme

# D'où vient l'arôme des truffes ?

Odorants of Truffle Fruiting Bodies  
with Aroma Descriptors

Sulfur volatiles	Dimethyl sulfide	Truffle, sulphur	■
	Dimethyl disulfide	Truffle, sulphur	■
	3-(Methylsulfanyl)propanal	Cooked potatoes	■
	Dimethyl trisulfide	Truffle, sulphur	■
	2-Methylfuran-3-thiol	Onion, meaty	■
	2,4-Dithiapentane	White truffle	■
Alcohols, esters, ketones and aldehydes	2-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Aged cheese, rubber	■
	3-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Onion, truffle	■
	3-Methylbutanal	Straw, toast	■
	Octan-3-one	Mushroom, sweet	■
	Oct-1-en-3-ol	Mushroom, earthy	■
	3-Methyl-1-butanol	Chocolate, whiskey	■
	Hexanal	Grassy, caramel	■
	Acetaldehyde	Alcohol, chemical	■
	Oct-1-en-3-one	Mushroom, dusty	■
	2-Methylpropanal	Chocolate, toast	■
	Ethyl butanoate	Fruity, green apple	■
	Non-2-enal	Green, fruity	■
	Butane-2,3-dione	Butter, cream	■
	Hex-1-en-3-one	Metallic, dusty	■
(2E,4E)-deca-2,4-dienal	Fatty, waxy	■	
Aromatic compounds	Ethyl 3-methylbutanoate	Fruity, anise	■
	3-Hydroxybutan-2-one	Butter, cheese	■
	Hex-2-enal	Fruit	■
	Benzaldehyde	Bitter almond	■
	2-Phenylethanol	Rose, flowery	■
	2-Phenylacetaldehyde	Styrene, daisy	■
	3-Ethyl-5-methylphenol	Phenolic, leather	■
	3-Ethylphenol	Leather, animal	■
Others	2-Methoxy-4-methylphenol	Phenolic, leather	■
	5-Methyl-2-propylphenol	Phenolic, gasoline	■
	3-Propylphenol	Phenolic, leather	■
	2-Phenylbut-2-enal	Heavy fruit, port wine	■
Others	Butanoic acid	Cheese	■
	4-Hydroxy-2,5-dimethylfuran-3-one	Cotton candy, Sweet	■

- L'arôme des truffes varie beaucoup d'une truffe à l'autre
- Facteurs intrinsèques (e.g. maturité) et externes (e.g. origine géographique/terroir)
- Différences à maturité égale pour des truffes issues d'une même truffière
- Génotype ? Microbiote ?

# Les truffes sont-elles capables de fabriquer l'ensemble des molécules aromatiques qui font leur leurs parfums ?

Odorants of Truffle Fruiting Bodies with Aroma Descriptors

		Truffles	
Sulfur volatiles	Dimethyl sulfide	Truffle, sulphur	
	Dimethyl disulfide	Truffle, sulphur	
	3-(Methylsulfanyl)propanal	Cooked potatoes	
	Dimethyl trisulfide	Truffle, sulphur	
	2-Methylfuran-3-thiol	Onion, meaty	
	2,4-Dithiapentane	White truffle	
	2-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Aged cheese, rubber	
	3-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Onion, truffle	
Alcohols, esters, ketones and aldehydes	3-Methylbutanal	Straw, toast	
	Octan-3-one	Mushroom, sweet	
	Oct-1-en-3-ol	Mushroom, earthy	
	3-Methyl-1-butanol	Chocolate, whiskey	
	Hexanal	Grassy, caramel	
	Acetaldehyde	Alcohol, chemical	
	Oct-1-en-3-one	Mushroom, dusty	
	2-Methylpropanal	Chocolate, toast	
	Ethyl butanoate	Fruity, green apple	
	Non-2-enal	Green, fruity	
	Butane-2,3-dione	Butter, cream	
	Hex-1-en-3-one	Metallic, dusty	
	(2E,4E)-deca-2,4-dienal	Fatty, waxy	
	Ethyl 3-methylbutanoate	Fruity, anise	
3-Hydroxybutan-2-one	Butter, cheese		
Hex-2-enal	Fruit		
Aromatic compounds	Benzaldehyde	Bitter almond	
	2-Phenylethanol	Rose, flowery	
	2-Phenylacetaldehyde	Styrene, daisy	
	3-Ethyl-5-methylphenol	Phenolic, leather	
	3-Ethylphenol	Leather, animal	
	2-Methoxy-4-methylphenol	Phenolic, leather	
	5-Methyl-2-propylphenol	Phenolic, gasoline	
	3-Propylphenol	Phenolic, leather	
2-Phenylbut-2-enal	Heavy fruit, port wine		
Others	Butanoic acid	Cheese	
	4-Hydroxy-2,5-dimethylfuran-3-one	Cotton candy, Sweet	

- Les truffes sont capables de produire les composés les plus abondants
- Certains composés rares / moins abondants ne sont pas produits par les truffes

# Les truffes sont-elles capables de fabriquer l'ensemble des molécules aromatiques qui font leur leurs parfums ?

Odorants of Truffle Fruiting Bodies with Aroma Descriptors

	Chemical Name	Aroma Descriptor	Truffles	Microbiote
Sulfur volatiles	Dimethyl sulfide	Truffle, sulphur	█	█
	Dimethyl disulfide	Truffle, sulphur	█	█
	3-(Methylsulfanyl)propanal	Cooked potatoes	█	█
	Dimethyl trisulfide	Truffle, sulphur	█	█
	2-Methylfuran-3-thiol	Onion, meaty	█	█
	2,4-Dithiapentane	White truffle	█	█
	2-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Aged cheese, rubber	█	█
	3-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Onion, truffle	█	█
Alcohols, esters, ketones and aldehydes	3-Methylbutanal	Straw, toast	█	█
	Octan-3-one	Mushroom, sweet	█	█
	Oct-1-en-3-ol	Mushroom, earthy	█	█
	3-Methyl-1-butanol	Chocolate, whiskey	█	█
	Hexanal	Grassy, caramel	█	█
	Acetaldehyde	Alcohol, chemical	█	█
	Oct-1-en-3-one	Mushroom, dusty	█	█
	2-Methylpropanal	Chocolate, toast	█	█
	Ethyl butanoate	Fruity, green apple	█	█
	Non-2-enal	Green, fruity	█	█
	Butane-2,3-dione	Butter, cream	█	█
	Hex-1-en-3-one	Metallic, dusty	█	█
	(2E,4E)-deca-2,4-dienal	Fatty, waxy	█	█
	Ethyl 3-methylbutanoate	Fruity, anise	█	█
3-Hydroxybutan-2-one	Butter, cheese	█	█	
Hex-2-enal	Fruit	█	█	
Aromatic	Benzaldehyde	Bitter almond	█	█
	2-Phenylethanol	Rose, flowery	█	█
	2-Phenylacetaldehyde	Styrene, daisy	█	█
	3-Ethyl-5-methylphenol	Phenolic, leather	█	█
	3-Ethylphenol	Leather, animal	█	█
	2-Methoxy-4-methylphenol	Phenolic, leather	█	█
	5-Methyl-2-propylphenol	Phenolic, gasoline	█	█
	3-Propylphenol	Phenolic, leather	█	█
2-Phenylbut-2-enal	Heavy fruit, port wine	█	█	
Others	Butanoic acid	Cheese	█	█
	4-Hydroxy-2,5-dimethylfuran-3-one	Cotton candy, Sweet	█	█

Truffles Microbiote

- Les truffes sont capables de produire les composés les plus abondants
- Certains composés rares / moins abondants ne sont pas produits par les truffes
- Le microbiote est capable de produire l'essentiel des arômes de la truffe



# Les truffes sont-elles capables de fabriquer l'ensemble des molécules aromatiques qui font leur leurs parfums ?

Odorants of Truffle Fruiting Bodies with Aroma Descriptors

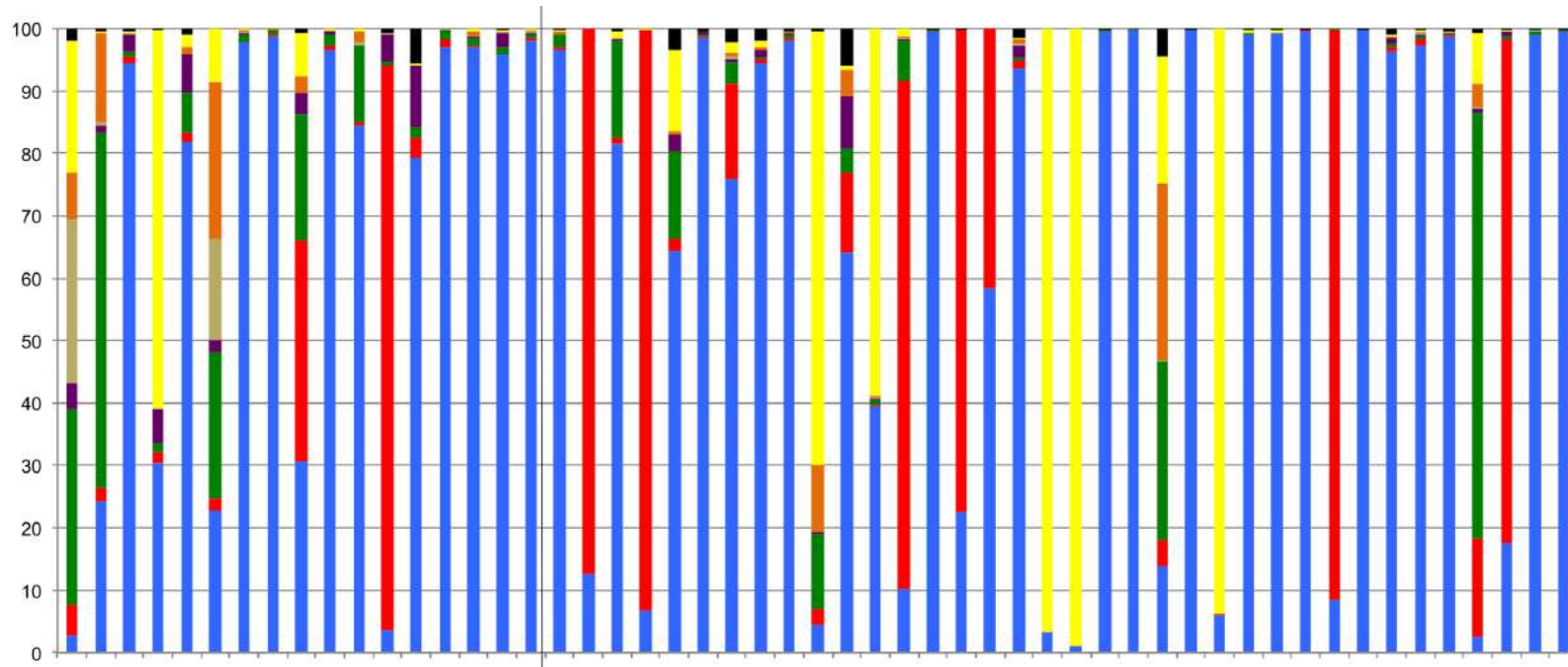
	Truffes	Microbiote			
Sulfur volatiles	Dimethyl sulfide	Truffle, sulphur			
	Dimethyl disulfide	Truffle, sulphur			
	3-(Methylsulfanyl)propanal	Cooked potatoes			
	Dimethyl trisulfide	Truffle, sulphur			
	2-Methylfuran-3-thiol	Onion, meaty			
	2,4-Dithiapentane	White truffle			
	2-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Aged cheese, rubber			
3-Methyl-4,5-dihydrothiophene	Onion, truffle				
Alcohols, esters, ketones and aldehydes	3-Methylbutanal	Straw, toast			
	Octan-3-one	Mushroom, sweet			
	Oct-1-en-3-ol	Mushroom, earthy			
	3-Methyl-1-butanol	Chocolate, whiskey			
	Hexanal	Grassy, caramel			
	Acetaldehyde	Alcohol, chemical			
	Oct-1-en-3-one	Mushroom, dusty			
	2-Methylpropanal	Chocolate, toast			
	Ethyl butanoate	Fruity, green apple			
	Non-2-enal	Green, fruity			
	Butane-2,3-dione	Butter, cream			
	Hex-1-en-3-one	Metallic, dusty			
	(2E,4E)-deca-2,4-dienal	Fatty, waxy			
	Ethyl 3-methylbutanoate	Fruity, anise			
3-Hydroxybutan-2-one	Butter, cheese				
Hex-2-enal	Fruit				
Aromatic compounds	Benzaldehyde	Bitter almond			
	2-Phenylethanol	Rose, flowery			
	2-Phenylacetaldehyde	Styrene, daisy			
	3-Ethyl-5-methylphenol	Phenolic, leather			
	3-Ethylphenol	Leather, animal			
	2-Methoxy-4-methylphenol	Phenolic, leather			
	5-Methyl-2-propylphenol	Phenolic, gasoline			
	3-Propylphenol	Phenolic, leather			
2-Phenylbut-2-enal	Heavy fruit, port wine				
Others	Butanoic acid	Cheese			
	4-Hydroxy-2,5-dimethylfuran-3-one	Cotton candy, Sweet			

- Les truffes sont capables de produire les composés les plus abondants
- Certains composés rares / moins abondants ne sont pas produits par les truffes
- Le microbiote est capable de produire l'essentiel des arômes de la truffe

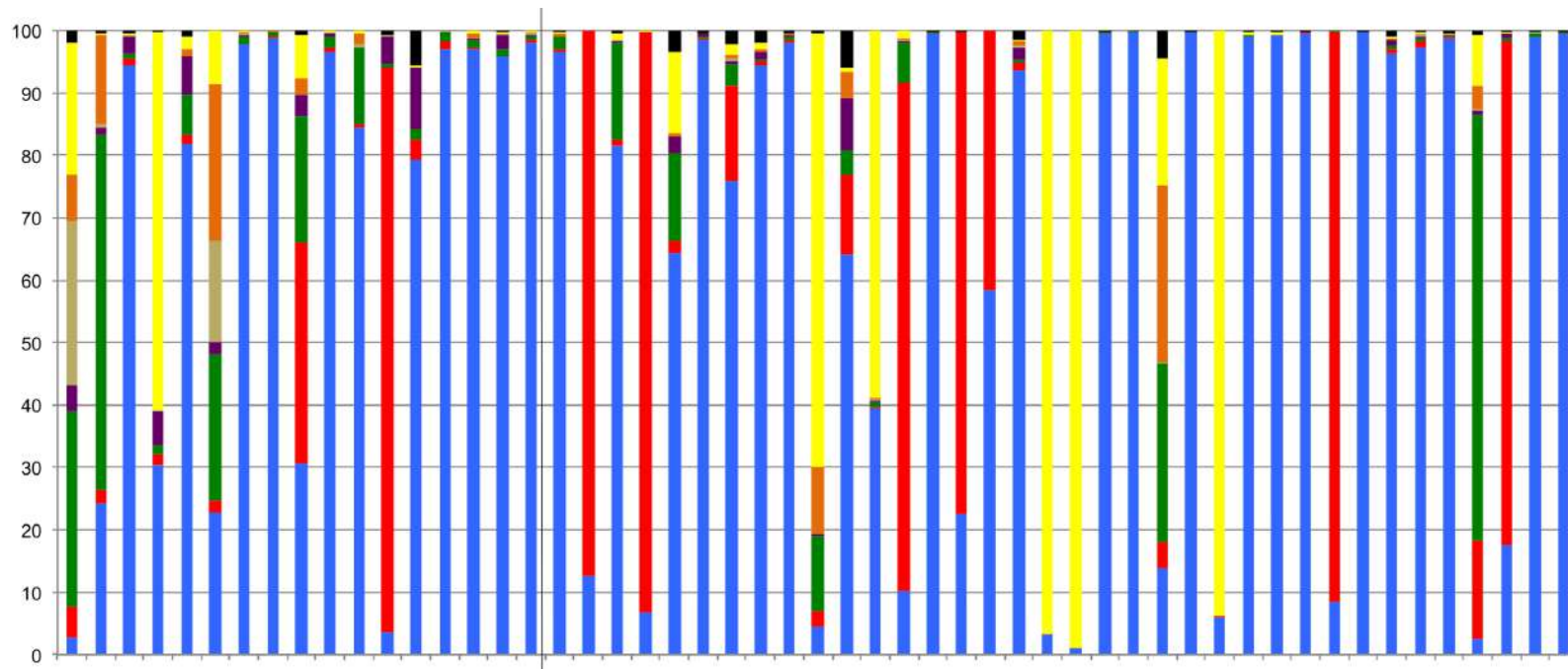
-> l'arôme des truffes est la résultante de l'activité combinée des truffes et de leur microbiote



# Les communautés bactériennes varient d'une truffe à l'autre



# Les communautés bactériennes varient d'une truffe à l'autre



-> les variations au sein du microbiote sont-elles en partie  
responsable des nuances arômes ?

# Les bactéries et la truffe

*En résumé :*

- *peu ou pas de rôle dans la nutrition des truffes pendant leur développement*
- *Ne sont pas la cause de maladie majeure connue*
- *Contribuent à la décomposition des truffes en fin de cycle*
- *Sont impliquées dans la formation et la détérioration de l'arôme*

*Merci de votre attention !*

contact: [aurelie.deveau@inrae.fr](mailto:aurelie.deveau@inrae.fr)



A fluorescence microscopy image of plant tissue. The image shows a complex network of cells with blue-stained cell walls and nuclei. Several large, dark, circular structures are visible, likely representing vascular bundles or large cells. There are also several bright green circular structures, possibly representing chloroplasts or specific organelles. Small orange spots are scattered throughout the tissue, indicating the presence of a specific marker or protein. The overall background is dark, making the fluorescent signals stand out.

*Merci de votre attention !*

*Questions*

contact: [aurelie.deveau@inrae.fr](mailto:aurelie.deveau@inrae.fr)