



Adaptation, atténuation, diversification : de la génétique végétale pour l'agroécologie

Timothée Flutre

► To cite this version:

Timothée Flutre. Adaptation, atténuation, diversification : de la génétique végétale pour l'agroécologie. École d'ingénieur. AgroParisTech, 22 place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau, France. 2025, pp.158. hal-05014269

HAL Id: hal-05014269

<https://hal.inrae.fr/hal-05014269v1>

Submitted on 31 Mar 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Conférence aux 1A d'AgroParisTech

Adaptation, atténuation, diversification : de la génétique végétale pour l'agroécologie

Timothée Flutre

Unité Génétique Quantitative et Évolution
Université Paris-Saclay — INRAE — CNRS — AgroParisTech
IDEEV, 91190 Gif-sur-Yvette

31/03/2025

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

Fronts de science et perspectives

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

Fronts de science et perspectives

Pourquoi êtes vous venu.e.s ?

Le scientifique fait de la recherche-action en ce sens qu'il recherche des financements, qu'il construit, qu'il essaye de convaincre les autorités [...], qu'il fait des conférences aux particuliers [...], tout cela en même temps que sa recherche [...].

Latour (1997)

D'où je parle

. étudiant Agro dont césure et M2 interdisciplinaire à l'université

D'où je parle

- . étudiant Agro dont césure et M2 interdisciplinaire à l'université
- . thèse en bioinformatique à l'Inra

D'où je parle

- . étudiant Agro dont césure et M2 interdisciplinaire à l'université
- . thèse en bioinformatique à l'Inra
- . post-doc en génétique statistique sur l'humain à Chicago

D'où je parle

- . étudiant Agro dont césure et M2 interdisciplinaire à l'université
- . thèse en bioinformatique à l'Inra
- . post-doc en génétique statistique sur l'humain à Chicago
- . chercheur Inra Montpellier en génétique quantitative sur la vigne

D'où je parle

- . étudiant Agro dont césure et M2 interdisciplinaire à l'université
- . thèse en bioinformatique à l'Inra
- . post-doc en génétique statistique sur l'humain à Chicago
- . chercheur Inra Montpellier en génétique quantitative sur la vigne
- . maintenant à Saclay sur la diversification intra-parcelle et le blé

D'où je parle

- . étudiant Agro dont césure et M2 interdisciplinaire à l'université
- . thèse en bioinformatique à l'Inra
- . post-doc en génétique statistique sur l'humain à Chicago
- . chercheur Inra Montpellier en génétique quantitative sur la vigne
- . maintenant à Saclay sur la diversification intra-parcelle et le blé
 - ▶ point d'arrivée proche du point de départ...
 - ▶ mais situation actuelle pas du tout imaginée au début !

D'où je parle

- . étudiant Agro dont césure et M2 interdisciplinaire à l'université
- . thèse en bioinformatique à l'Inra
- . post-doc en génétique statistique sur l'humain à Chicago
- . chercheur Inra Montpellier en génétique quantitative sur la vigne
- . maintenant à Saclay sur la diversification intra-parcelle et le blé
 - ▶ point d'arrivée proche du point de départ...
 - ▶ mais situation actuelle pas du tout imaginée au début !

Cette présentation est donc mon interprétation personnelle, influencée par des lectures et discussions, des **mécanismes** principaux, des **enjeux** prioritaires et des **stratégies** pertinentes.

Objectif de cette présentation

- ▶ S'intéresser à la génétique (discipline scientifique), est-ce pertinent pour l'agroécologie ?
- ▶ La sélection artificielle (domaine d'application) peut-elle contribuer à la transition agroécologique ?

Objectif de cette présentation

- ▶ S'intéresser à la génétique (discipline scientifique), est-ce pertinent pour l'agroécologie ?
- ▶ La sélection artificielle (domaine d'application) peut-elle contribuer à la transition agroécologique ?

Conseil : concentrez-vous sur les **messages dans les titres** des (nombreuses) diapos, le contenu des diapos fournissant des justifications sourcées à regarder plus tard.

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

Fronts de science et perspectives

Définition juridique des activités agricoles

*Sont réputées agricoles toutes les activités correspondant à la **maîtrise et à l'exploitation d'un cycle biologique de caractère végétal ou animal** et constituant une ou plusieurs étapes nécessaires au déroulement de ce cycle ainsi que les activités exercées par un exploitant agricole qui sont dans le prolongement de l'**acte de production** ou qui ont pour support l'exploitation.*

Article L311-1 du Code rural au 22 mai 2019

Notion centrale de **risque**

Veyret et Reghezza (2005) :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$$

- ▶ Aléa : possibilité que se produise un événement impliquant une perturbation de l'équilibre d'un milieu
- ▶ Vulnérabilité : mesure dans laquelle un système socio-spatial risque d'être affecté par les effets d'un aléa

⇒ si aléa ↗, besoin de ↘ vulnérabilité pour risque ≈

Notion centrale de **risque**

In the agricultural sector, [...] uncertainty and risk stem from a multitude of factors such as hazards related to weather, pests and diseases, or changes in both market conditions and the policy context in which farmers operate and trade.

Iyer et coll. (2020)

Définition biologique de l'agriculture

*A system of cultivating **domesticated** plants and practicing animal husbandry to obtain **food**, **resources**, and other services.*

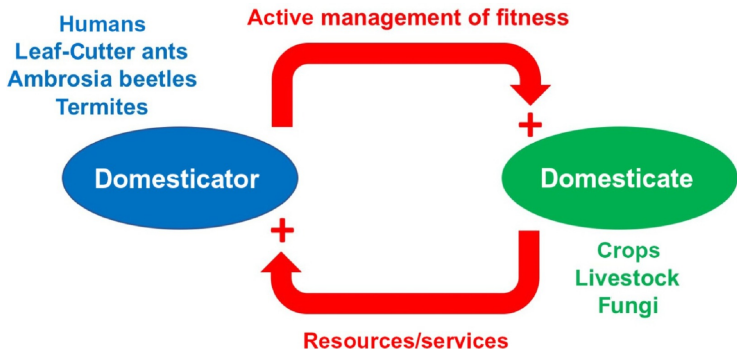
Purugganan (2022)

Domestication : un processus de **co-évolution**

*Coevolutionary process that arises from a **mutualism**, in which one species (the domesticator) **constructs an environment** where it actively manages both the **survival and reproduction** of another species (the domesticate) in order to provide the former with resources and/or services.*

Purugganan (2022)

Domestication : un processus de **co-évolution**



Purugganan (2022)

Notions d'écologie et d'évolution

- ▶ Mutualisme : interaction écologique entre des espèces où chaque espèce tire un bénéfice net

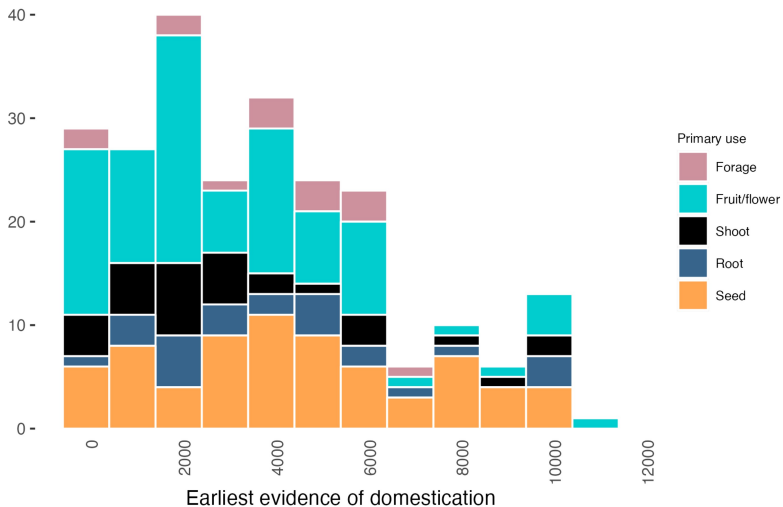
Notions d'écologie et d'évolution

- ▶ Mutualisme : interaction écologique entre des espèces où chaque espèce tire un bénéfice net
- ▶ Construction de niche : processus par lequel un organisme modifie son propre environnement (ou celui d'un autre organisme), souvent à son avantage et pouvant conduire à des changements évolutifs

Notions d'écologie et d'évolution

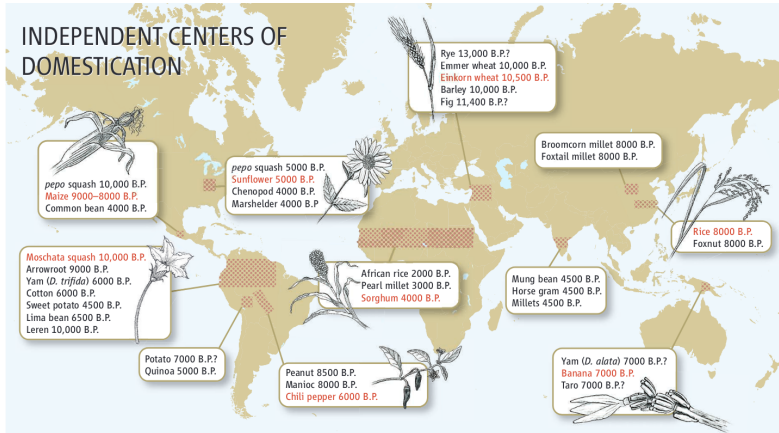
- ▶ Mutualisme : interaction écologique entre des espèces où chaque espèce tire un bénéfice net
- ▶ Construction de niche : processus par lequel un organisme modifie son propre environnement (ou celui d'un autre organisme), souvent à son avantage et pouvant conduire à des changements évolutifs
- ▶ Valeur sélective (*fitness*) : propension à avoir du succès évolutif ; composantes = survie et reproduction

Domestication humaine



Alam et Purugganan (2024)

Domestication humaine



Balter (2007)

Minimiser le risque du manque de ressources

Certains (ex. Zeder, 2015) attribue à la domestication le but de **fournir** des ressource à l'espèce domesticatrice **de manière** plus **prédictible**.

Minimiser le risque du manque de ressources

Certains (ex. Zeder, 2015) attribue à la domestication le but de **fournir** des ressource à l'espèce domesticatrice **de manière** plus **prédictible**.

Prediction is very difficult, especially about the future.

Bohr

Minimiser le risque du manque de ressources

Certains (ex. Zeder, 2015) attribue à la domestication le but de **fournir** des ressource à l'espèce domesticatrice **de manière** plus **prédictible**.

Prediction is very difficult, especially about the future.

Bohr

⇒ Développement de comportements / pratiques pour améliorer la productivité **et** sa prédictibilité

Comportements d'espèces agricultrices

TABLE 1 Agricultural behaviors of farming ants, termites, beetles, and humans

Agricultural behavior	Agriculture in:			
	Attine ants	Macrotermite termites	Xyleborine ambrosia beetles	Humans
Dependency on crop for food	Obligate	Obligate	Obligate	Facultative
Engineering of optimal growth conditions for crop (e.g., substrate preparation; moisture or humidity regulation)	Present	Present	Present	Present
Planting of crop on improved substrate	Present	Present	Present	Present
Intensive, continuous monitoring of growth and disease status of all crops	Present	Present	Present	Absent
Sustainable harvesting of crop for food	Present	Present	Present	Present
Protection of crop from diseases and consumers	Present	Present	Present	Present
Weeding of alien organisms invading the garden	Present	Present	Unknown	Present
Use of chemical herbicides to combat pests	Present	Unknown	Unknown	Present
Use of microbial symbionts for nutrient procurement for the crop	Present	Unknown	Unknown	Present
Use of disease-suppressant microbes for biological pest control	Present	Unknown	Unknown	Absent ¹
Sociality	Strictly eusocial	Strictly eusocial	Subsocial or communal ²	Social
Task partitioning in agricultural processes	Present	Unknown	Present	Present
Application of artificial selection for crop improvement	Unknown, but ants exert symbiont choice	Unknown	Unknown	Present
Learning and cultural transmission of agricultural innovations	Absent	Absent	Absent	Present

Mueller et coll. (2005)

Agriculture européenne médiévale



1310

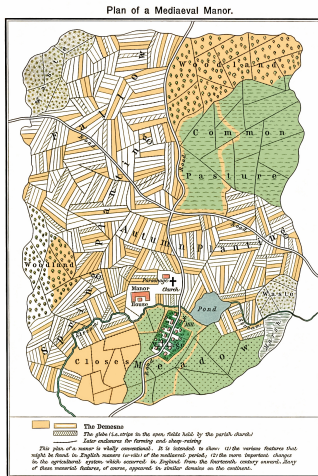
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reeve_and_Serfs.jpg

Agriculture européenne médiévale



Crescent (≈ 1306)

Agriculture européenne médiévale



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plan_mediaeval_manor.jpg

TABLE 4. Cereal production that could be supported by the phosphorus transported by one sheep in a year (= 254 g)

	<i>Peas, beans</i>	<i>Wheat</i>	<i>Rye</i>	<i>Barley</i>	<i>Oats</i>
Concentration of P in grain (g/kg)	4.0	3.6	3.1	3.1	3.6
Weight: volume (kg per bushel) ^a	25.1	23.9	22.9	20.5	16.0
Amount of grain containing 254 g of P (= grain supported by one sheep)					
weight (kg) ^b	63.4	70.4	81.8	81.8	70.4
volume (bushels) ^c	3.0	3.5	4.2	4.7	5.2

Newman (2002)

Agriculture européenne en 1850

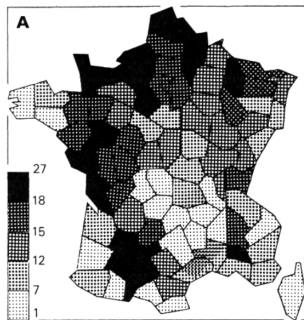


Lhermitte (1882)

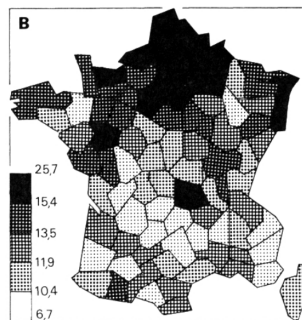
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lhermitte_La_Paye_des_moissonneurs.jpg

Agriculture européenne en 1850

Surface en blé (en %) :

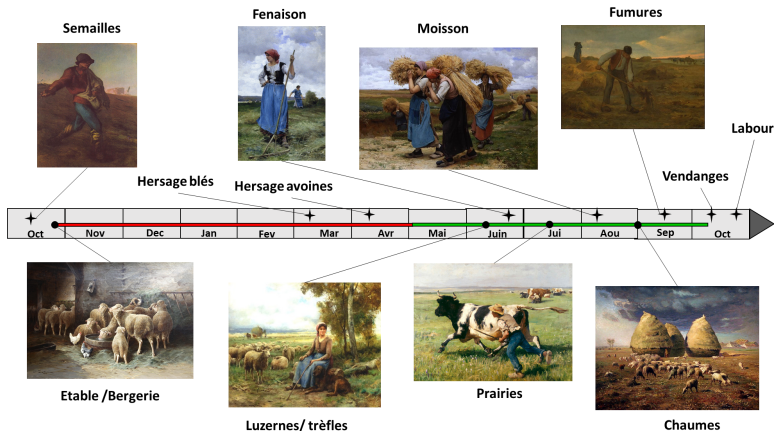


Rendement (en hl/ha) :



Heffer et coll. (1986)

Biogéochimie de la Beauce au XIX^e

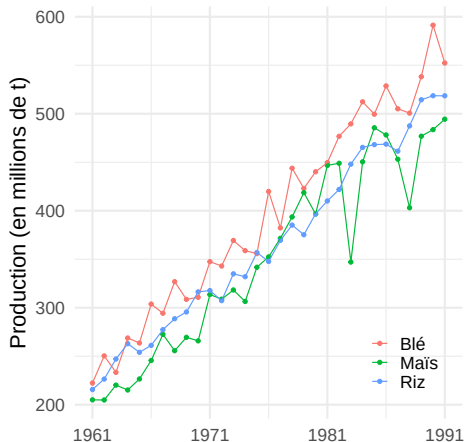


Anglade et coll. (2015)

Révolution verte

Production mondiale

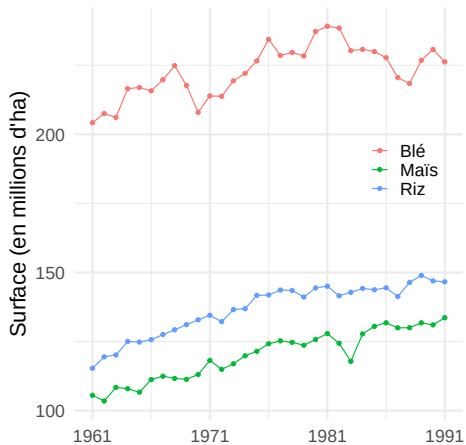
Source : FAO



Révolution verte

Surface mondiale récoltée

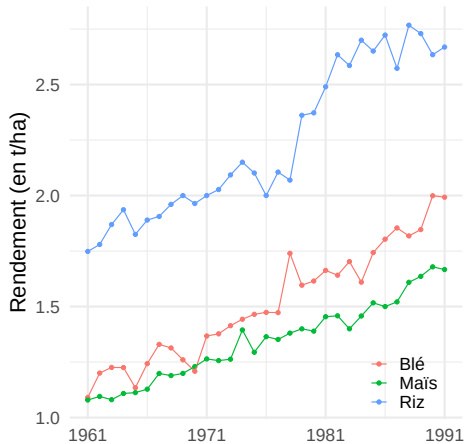
Source : FAO



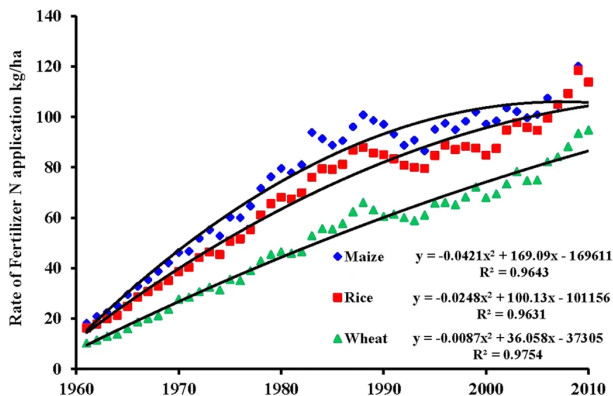
Révolution verte

Rendement médian

Source : FAO

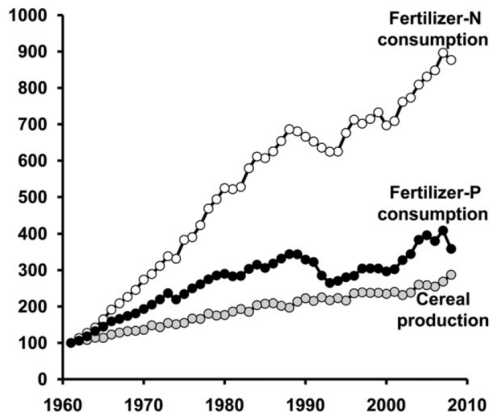


Fertilisation, notamment azotée



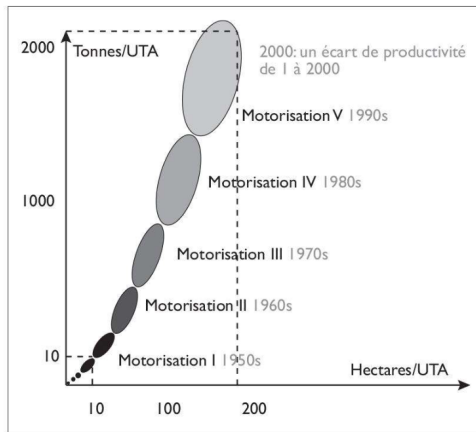
Ladha et coll. (2016)

Fertilisation, notamment azotée



Hinsinger et coll. (2011)

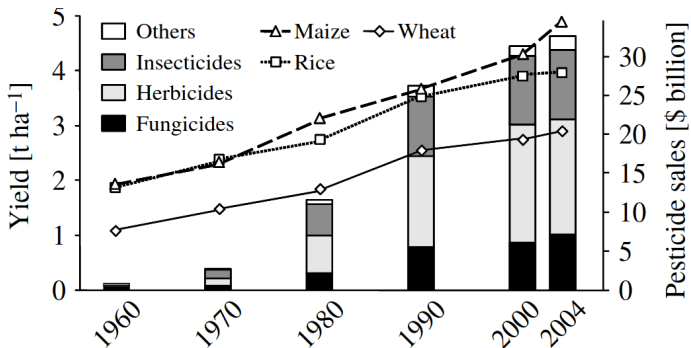
Mécanisation



UTA : Unité travailleur agricole, soit l'équivalent d'un travailleur à temps plein.

Mazoyer et Roudart (2002)

Pesticides



Oerke (2006)

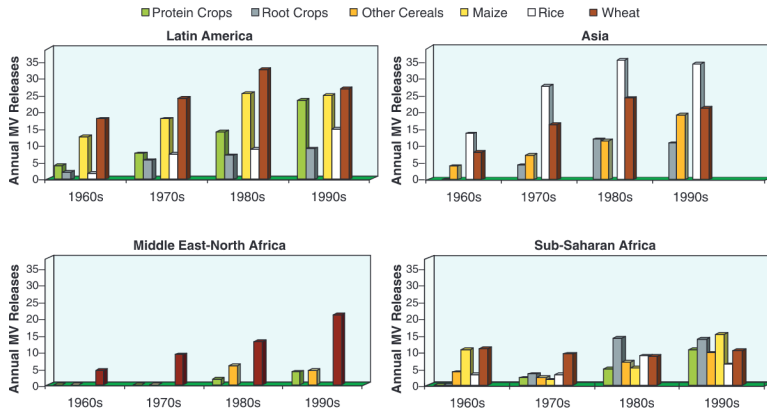
Irrigation

Rice yields as a result of water control measures and the use of additional inputs

Degree of water control	Use of input		Rice yield (tons/ha)			Rice yield obtainable as average (tons/ha)
			1971	1972	1973	
No water control (rainfed, uncontrolled flooding)	nil	Laos	1.2	1.2	1.3	1.2
Successive introduction of water control						
(a) elimination of floods	nil	Khmer Republic	1.5	1.4	1.3	1.5
(b) elimination of drought	low fertilizer application	Burma	1.7	1.6	1.7	
		India	1.7	1.6	1.7	
		Thailand	1.9	1.8	2.0	2.0
(c) full water control (irrigation and drainage)	low fertilizer application	Pakistan	2.3	2.4	2.4	
		Vietnam Republic	2.4	2.4	2.5	
		Sri Lanka	2.4	2.4	2.3	
		Malaysia	2.5	2.4	2.5	2.5
(d) sophisticated management practices (midseason drying)	high fertilizer use + improved seeds and pest control + diversification, mechanization	Korea	4.6	4.6	4.9	5.0
		Japan	5.2	5.8	5.9	6.0
experimental conditions						10

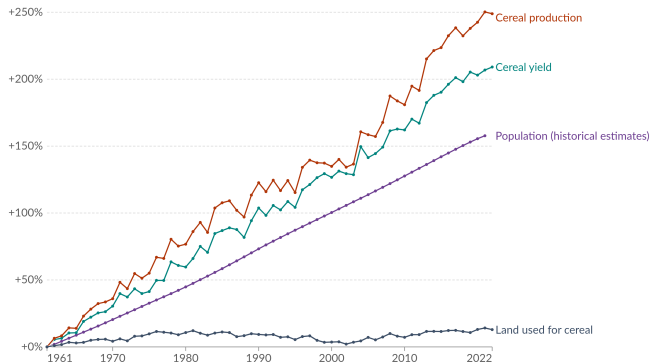
Doorenbos (1975)

Variétés issues de programmes de sélection



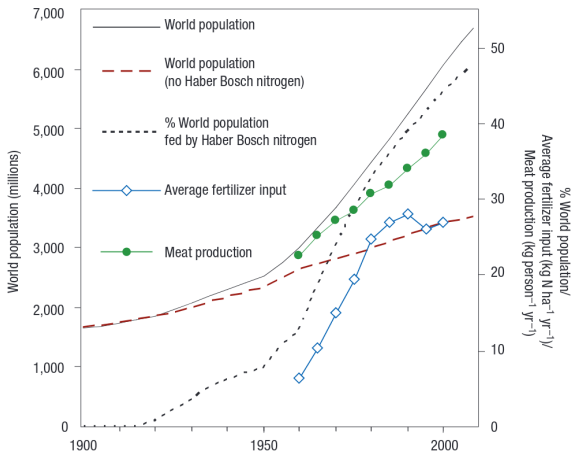
Evenson et Gollin (2003)

Rendement en céréales et population humaine



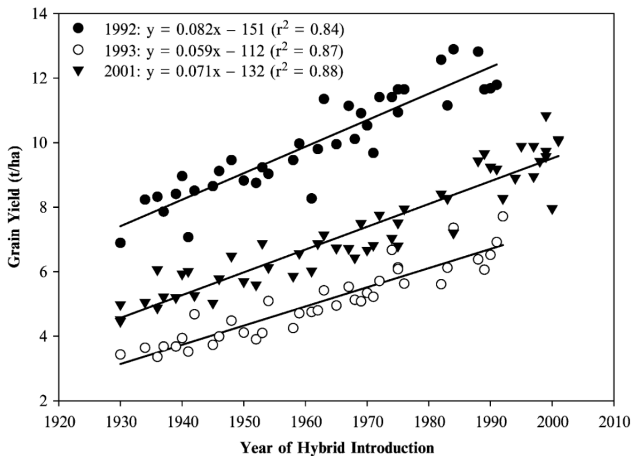
OurWorldinData.org (2023)

Influence du procédé Haber-Bosch



Erismann et coll. (2008)

Exemple de gain génétique réalisé



Duvick (2005)

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

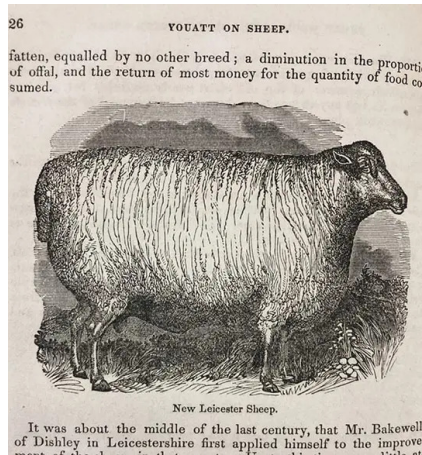
Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

Fronts de science et perspectives

Sélection massale



Youatt (1854) à propos de Bakewell au XVIII^e siècle

Sélection massale

Vilmorin (1856) :

*Le but que je me suis proposé était d'abord tout pratique : il s'agissait de **créer une race de betteraves plus sucrées** que celles que l'on cultive ordinairement, en choisissant pour porte-graines les racines les plus sucrées.*

*Ayant donc maintenant un **moyen** à la fois très-rapide et très-correct **d'apprécier la densité du jus** des racines sur lesquelles j'opère, j'ai pu aborder avec assurance l'étude de la question fondamentale de cette expérience : celle de la transmission héréditaire de la qualité sucrée.*

*on conçoit combien il était nécessaire de **récolter séparément les graines de chaque plante**; cela m'a amené à posséder un état civil et une **généalogie** parfaitement correcte de toutes mes plantes depuis le commencement de l'expérience.*

La sélection comme mécanisme évolutif majeur

Darwin (1859) :

[...] la nature fournit les variations successives, l'homme les accumule dans certaines directions qui lui sont utiles.

La sélection comme mécanisme évolutif majeur

Darwin (1859) :

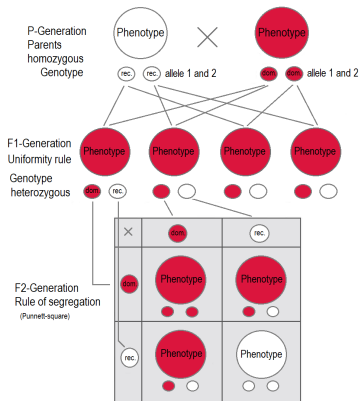
[...] la nature fournit les variations successives, l'homme les accumule dans certaines directions qui lui sont utiles.

J'ai donné à ce principe, en vertu duquel une variation si insignifiante qu'elle soit se conserve et se perpétue, le nom de sélection naturelle.

Base de la variation discrète des caractères

Mendel (1865) :

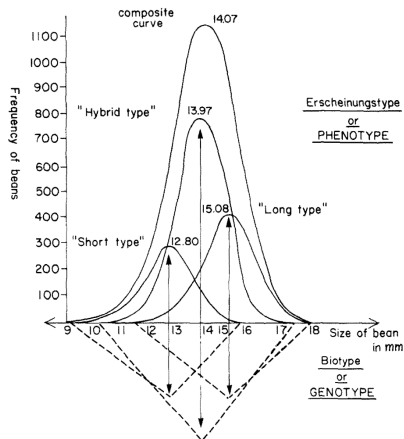
- ▶ loi d'uniformité et de dominance (F1)
- ▶ loi de ségrégation (F2)
- ▶ loi d'indépendance (2 locus)



Scienca58 (2019)

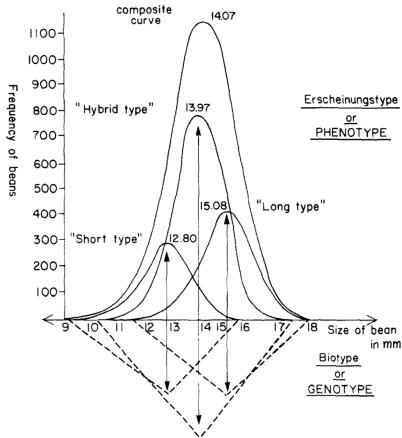
Distinction entre phénotype et génotype

- 2 lignées pures : $\bar{P}_1 < \bar{P}_2$



Graphique de Churchill (1974) à partir des données de Johanssen (1909)

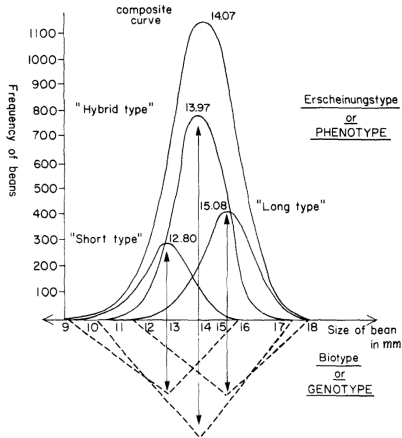
Distinction entre phénotype et génotype



- ▶ 2 lignées pures : $\bar{P}_1 < \bar{P}_2$
- ▶ F1 : réponse à la sélection = 0
 $var(P_{F1}) = var(\epsilon)$

Graphique de Churchill (1974) à partir des données de Johansen (1909)

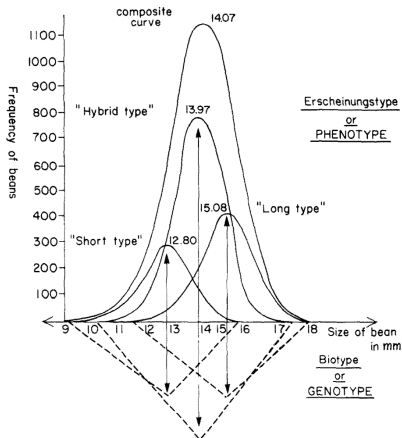
Distinction entre phénotype et génotype



Graphique de Churchill (1974) à partir des données de Johansen (1909)

- ▶ 2 lignées pures : $\bar{P}_1 < \bar{P}_2$
- ▶ F1 : réponse à la sélection = 0
 $var(P_{F1}) = var(\epsilon)$
- ▶ F2 : réponse à la sélection > 0
 $var(P_{F2}) = var(G_{F2}) + var(\epsilon)$

Distinction entre phénotype et génotype



- ▶ 2 lignées pures : $\bar{P}_1 < \bar{P}_2$
- ▶ F1 : réponse à la sélection = 0
 $var(P_{F1}) = var(\epsilon)$
- ▶ F2 : réponse à la sélection > 0
 $var(P_{F2}) = var(G_{F2}) + var(\epsilon)$

Génétique = étude de la
variation héritable :

- ▶ $P = G + \epsilon$
- ▶ $G = \mathbb{E}_{\epsilon}[P]$

Graphique de Churchill (1974) à partir des données de Johansen (1909)

Régression phénotype-génotype et héritabilité au sens large

Régression linéaire simple :

$$G_i = \mu + \beta P_i + \epsilon_i$$

Régression phénotype-génotype et héritabilité au sens large

Régression linéaire simple :

$$G_i = \mu + \beta P_i + \epsilon_i$$

Moindres carrés : $\hat{\beta} = \frac{\text{cov}(G,P)}{\text{var}(P)}$

Régression phénotype-génotype et hérédabilité au sens large

Régression linéaire simple :

$$G_i = \mu + \beta P_i + \epsilon_i$$

Moindres carrés : $\hat{\beta} = \frac{\text{cov}(G, P)}{\text{var}(P)}$

$$\text{cov}(G, P) = \text{cov}(G, \mu + G + \epsilon)$$

Régression phénotype-génotype et héritabilité au sens large

Régression linéaire simple :

$$G_i = \mu + \beta P_i + \epsilon_i$$

Moindres carrés : $\hat{\beta} = \frac{\text{cov}(G, P)}{\text{var}(P)}$

$$\text{cov}(G, P) = \text{cov}(G, \mu + G + \epsilon)$$

$$\hat{\beta} := \frac{\text{var}(G)}{\text{var}(P)} := H^2$$

Régression phénotype-génotype et hérabilité au sens large

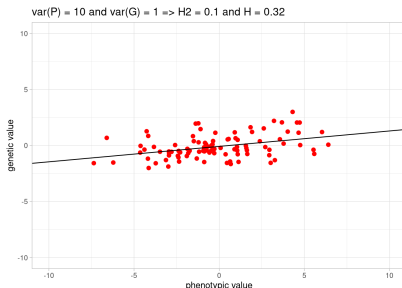
Régression linéaire simple :

$$G_i = \mu + \beta P_i + \epsilon_i$$

$$\text{Moindres carrés : } \hat{\beta} = \frac{\text{cov}(G, P)}{\text{var}(P)}$$

$$\text{cov}(G, P) = \text{cov}(G, \mu + G + \epsilon)$$

$$\hat{\beta} := \frac{\text{var}(G)}{\text{var}(P)} := \mathbf{H^2}$$



Régression phénotype-génotype et héritabilité au sens large

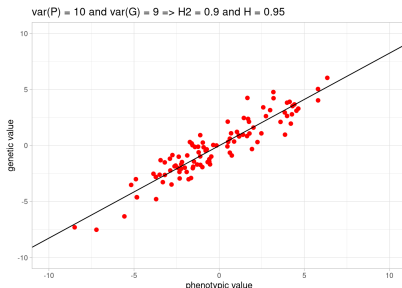
Régression linéaire simple :

$$G_i = \mu + \beta P_i + \epsilon_i$$

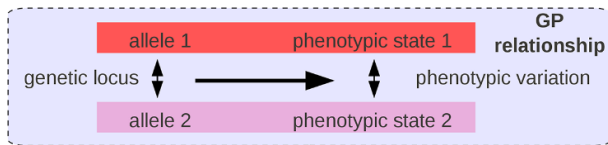
$$\text{Moindres carrés : } \hat{\beta} = \frac{\text{cov}(G, P)}{\text{var}(P)}$$

$$\text{cov}(G, P) = \text{cov}(G, \mu + G + \epsilon)$$

$$\hat{\beta} := \frac{\text{var}(G)}{\text{var}(P)} := H^2$$



Interprétation de la relation génotype-phénotype



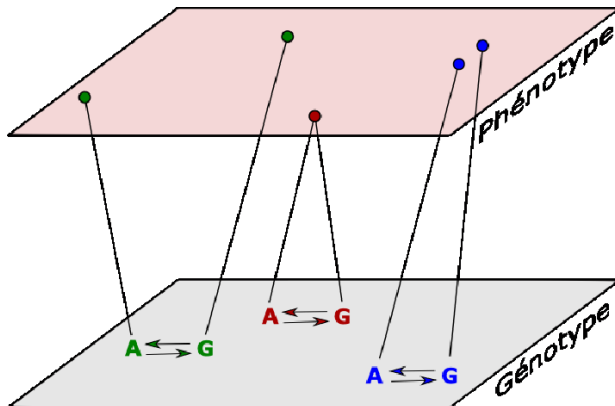
Orgogozo et coll. (2015) :

Variation at a given gene causes variation in a given phenotype

De Vienne (2021) :

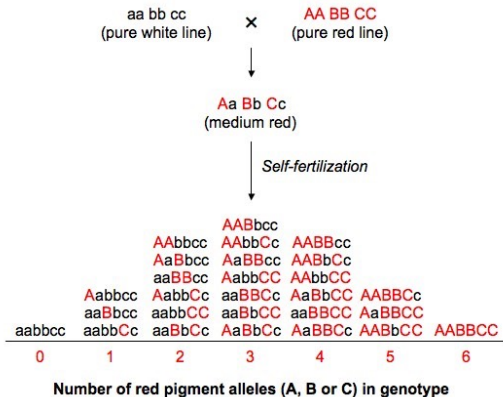
A gene does not make a trait, but [...] a genetic difference makes a phenotypic difference

Interprétation de la relation génotype-phénotype



De Vienne (2025)

Base de la variation continue des caractères



BioNinja

Modèle infinitésimal

Fisher (1918) :

- ▶ la valeur d'un génotype peut être décomposée en une partie qui se transmet, la *breeding value* (BV), et une qui ne se transmet pas : $G = BV + \text{reste}$
 - ▶ $BV_{\text{enfant}} = \frac{BV_{\text{par.1}} + BV_{\text{par.2}}}{2} + \text{aléa de méiose}$
 - ▶ BV : valeur génétique *additive*

Modèle infinitésimal

Fisher (1918) :

- ▶ la valeur d'un génotype peut être décomposée en une partie qui se transmet, la *breeding value* (BV), et une qui ne se transmet pas : $G = BV + \text{reste}$
 - ▶ $BV_{\text{enfant}} = \frac{BV_{\text{par.1}} + BV_{\text{par.2}}}{2} + \text{aléa de méiose}$
 - ▶ BV : valeur génétique *additive*
- ▶ la covariance entre BV_i et BV_j dépend de leur variance, σ_a^2 , et du coef. d'*apparentement* (généalogie $\rightarrow$ matrice A)

Modèle infinitésimal

Fisher (1918) :

- ▶ la valeur d'un génotype peut être décomposée en une partie qui se transmet, la *breeding value* (BV), et une qui ne se transmet pas : $G = BV + \text{reste}$
 - ▶ $BV_{\text{enfant}} = \frac{BV_{\text{par.1}} + BV_{\text{par.2}}}{2} + \text{aléa de méiose}$
 - ▶ BV : valeur génétique *additive*
- ▶ la covariance entre BV_i et BV_j dépend de leur variance, σ_a^2 , et du coef. d'*apparentement* (généalogie $\rightarrow$ matrice A)
- ▶ $BV = \sum_{\text{gène}}^{\infty} 1 \text{ nb d'allèles au gène} \times \text{effet allélique}$

Modèle infinitésimal

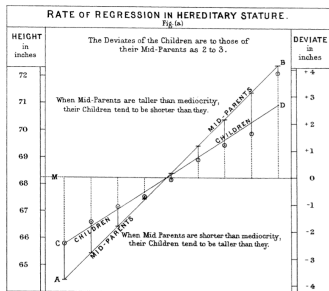
Fisher (1918) :

- ▶ la valeur d'un génotype peut être décomposée en une partie qui se transmet, la *breeding value* (BV), et une qui ne se transmet pas : $G = BV + \text{reste}$
 - ▶ $BV_{\text{enfant}} = \frac{BV_{\text{par.1}} + BV_{\text{par.2}}}{2} + \text{aléa de méiose}$
 - ▶ BV : valeur génétique *additive*
- ▶ la covariance entre BV_i et BV_j dépend de leur variance, σ_a^2 , et du coef. d'*apparentement* (généalogie $\rightarrow$ matrice A)
- ▶ $BV = \sum_{\text{gène}}^{\infty} \text{nb d'allèles au gène} \times \text{effet allélique}$
- ▶ $\forall i, BV_{\text{enfant } i} \sim \mathcal{N}(BV_{\text{parent moyen}}, \sigma_a^2)$

Régression parents-enfant et hérédité au sens strict

Régression linéaire simple :

$$P_{e,i} = \mu + \beta P_{pm,i} + \epsilon_i$$



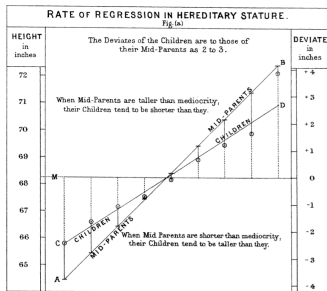
Galton (1886)

Régression parents-enfant et hérabilité au sens strict

Régression linéaire simple :

$$P_{e,i} = \mu + \beta P_{pm,i} + \epsilon_i$$

$$\text{Moindres carrés : } \hat{\beta} = \frac{\text{cov}(P_e, P_{pm})}{\text{var}(P_{pm})}$$



Galton (1886)

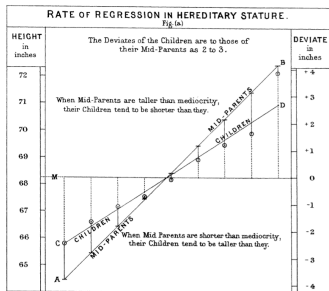
Régression parents-enfant et hérabilité au sens strict

Régression linéaire simple :

$$P_{e,i} = \mu + \beta P_{pm,i} + \epsilon_i$$

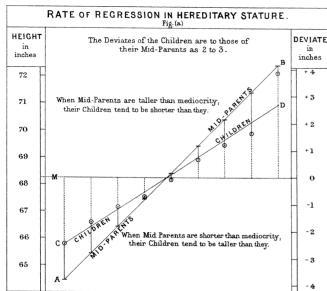
$$\text{Moindres carrés : } \hat{\beta} = \frac{\text{cov}(P_e, P_{pm})}{\text{var}(P_{pm})}$$

$$\text{Mais } \mathbb{E}[P_e | P_{pm}] = \mu + BV_{pm}$$



Galton (1886)

Régression parents-enfant et hérédité au sens strict



Galton (1886)

Régression linéaire simple :

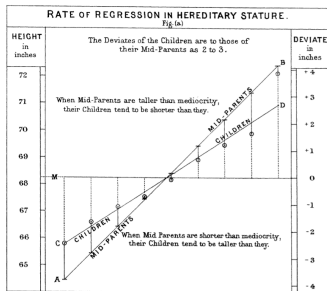
$$P_{e,i} = \mu + \beta P_{pm,i} + \epsilon_i$$

$$\text{Moindres carrés : } \hat{\beta} = \frac{\text{cov}(P_e, P_{pm})}{\text{var}(P_{pm})}$$

$$\text{Mais } \mathbb{E}[P_e | P_{pm}] = \mu + BV_{pm}$$

$$\text{Donc } \text{cov}(P_e, P_{pm}) = \sigma_a^2$$

Régression parents-enfant et hérédité au sens strict



Galton (1886)

Régression linéaire simple :

$$P_{e,i} = \mu + \beta P_{pm,i} + \epsilon_i$$

$$\text{Moindres carrés : } \hat{\beta} = \frac{\text{cov}(P_e, P_{pm})}{\text{var}(P_{pm})}$$

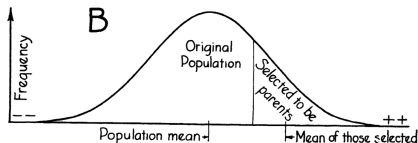
$$\text{Mais } \mathbb{E}[P_e | P_{pm}] = \mu + B V_{pm}$$

$$\text{Donc } \text{cov}(P_e, P_{pm}) = \sigma_a^2$$

$$\text{Ainsi : } \hat{\beta} = \frac{\sigma_a^2}{\text{var}(P_{pm})} := h^2$$

Réponse à la sélection : équation du sélectionneur

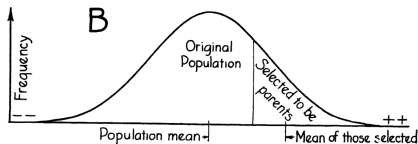
Lush (1937, 1943) :



- ▶ différentiel : $S = \bar{P}_{\text{parents sélectionnés}} - \bar{P}_{\text{tous les parents}}$
- ▶ réponse : $R = \bar{P}_{\text{enfants}} - \bar{P}_{\text{parents}}$

Réponse à la sélection : équation du sélectionneur

Lush (1937, 1943) :

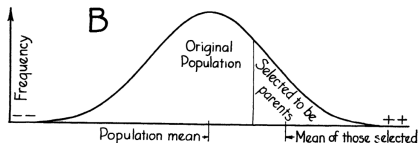


- ▶ différentiel : $S = \bar{P}_{\text{parents sélectionnés}} - \bar{P}_{\text{tous les parents}}$
- ▶ réponse : $R = \bar{P}_{\text{enfants}} - \bar{P}_{\text{parents}}$

$$R = h^2 S$$

Réponse à la sélection : équation du sélectionneur

Lush (1937, 1943) :



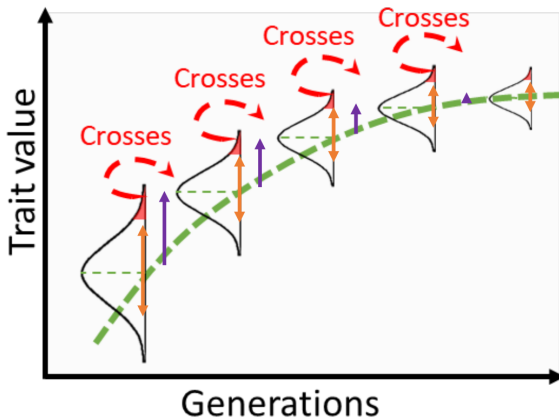
- ▶ différentiel : $S = \bar{P}_{\text{parents sélectionnés}} - \bar{P}_{\text{tous les parents}}$
- ▶ réponse : $R = \bar{P}_{\text{enfants}} - \bar{P}_{\text{parents}}$

$$R = h^2 S$$

<https://timflutre.shinyapps.io/intro-breeder-eq/>

Réponse multi-générationnelle à la sélection directionnelle

Augmentation de la moyenne mais diminution de la variance :



Diapo de L. Moreau

Augmenter l'efficacité de la sélection

$$R = \frac{i\rho\sigma_a}{\Delta T}$$

- ▶ augmenter ρ (précision des valeurs génétiques)
- ▶ augmenter σ_a (variabilité génétique)
- ▶ augmenter i (intensité de sélection)
- ▶ diminuer ΔT (intervalle de temps entre deux générations)

Nombreux travaux sur les plans d'expérience incomplets (~ 1930), l'utilisation des marqueurs génomiques (~ 1990), du phénotypage à haut-débit (~ 2010), etc.

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

Fronts de science et perspectives

Au travers de l'augmentation des rendements, les innovations de la Révolution Verte ont *indubitablement* contribué à l'augmentation de la population humaine.

Au travers de l'augmentation des rendements, les innovations de la Révolution Verte ont *indubitablement* contribué à l'augmentation de la population humaine.

Mais de nombreuses et profondes transformations sont également survenues, et le constat n'est pas si simple.

It is unclear whether high-intensity agriculture can be sustained, because of the loss of soil fertility, the erosion of soil, the increased incidence of crop and livestock diseases, and the high energy and chemical inputs associated with it. [...] It is not clear which is greater—the success of modern high intensity agriculture, or its shortcomings.

Tilman (1998)

Perte de fertilité du sol due au labour

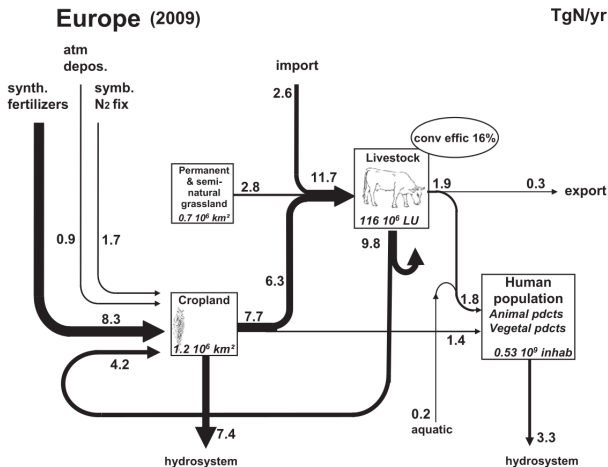
Table 1. Comparison of mean residence time (MRT)¹ of the soil C (present prior to the initiation of the experiment) under no-till and conventional (plow-based) tillage, derived from measurements of ¹³C natural abundance.

Site	MRT in NT (years)	MRT in CT (years)	NT/CT	Reference
Sidney, Nebraska	73	44	1.7	Six et al. 1998
Boigneville (France)	38	18	2.1	Balesdent et al. 1990
Delhi (Canada)	26	14	1.9	Ryan et al. 1995

¹ Mean residence times were calculated using a first-order decomposition model, $k = \ln(A_0/A_t)/t$, where A_0 is the SOC present at the beginning of the experiment and A_t is the amount of the original SOC remaining after time t . The MRT is the inverse ($1/k$) of the decomposition rate constant. In each of the experiments, a shift in vegetation (between C_3 and C_4 species) occurred at the start of the experiment. Thus, SOC present at the start of the experiment could be differentiated from that derived from subsequent crop residues, based on the ¹³C signatures.

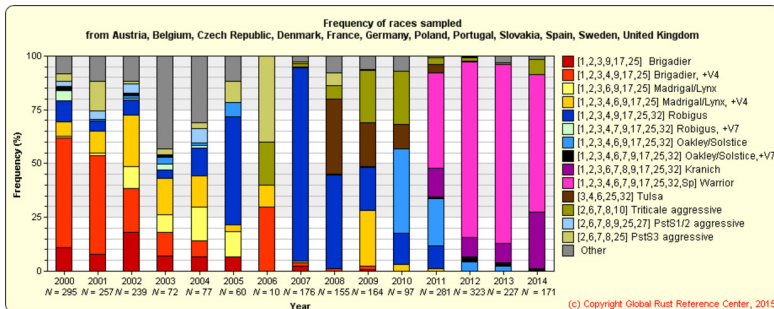
Paustian et coll. (2000)

Flux et pertes d'azote



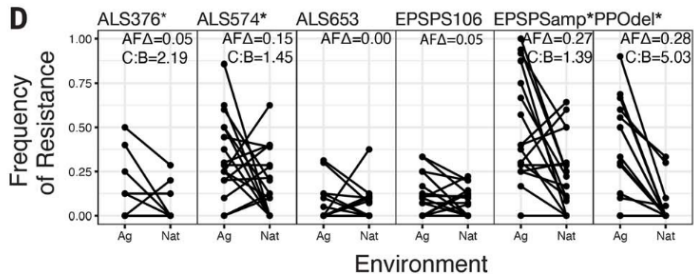
Billen et coll. (2014)

Emergence de souches pathogènes en Europe



Hovmøller et coll. (2016)

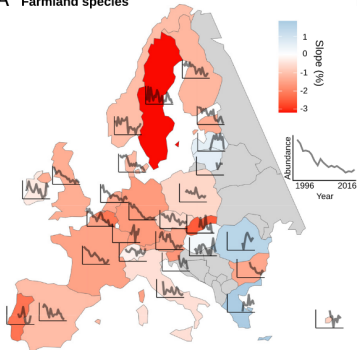
Sélection d'adventice aux Etats-Unis



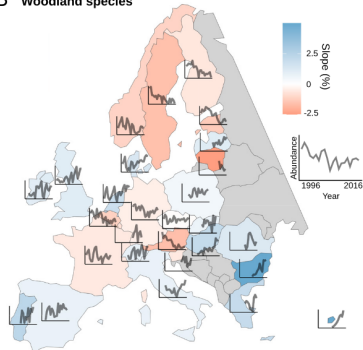
Kreiner et coll. (2022)

Déclin d'oiseaux dans les espaces cultivés

A Farmland species

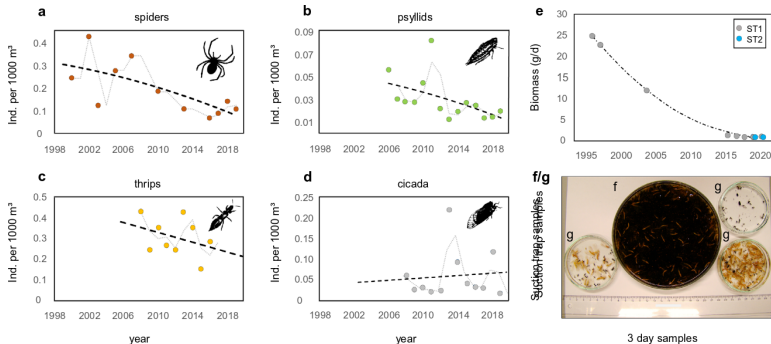


B Woodland species



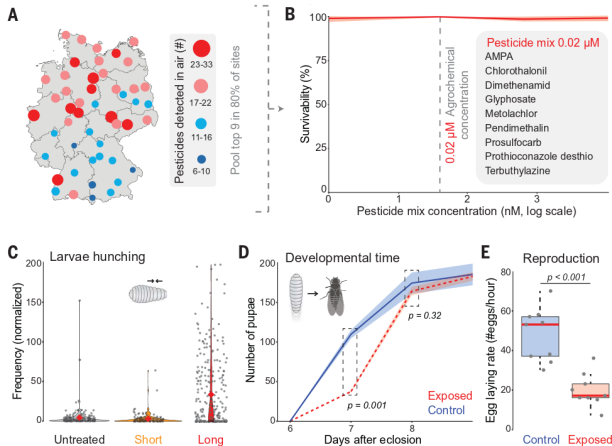
Rigal et coll. (2023)

Déclin d'insectes en Allemagne



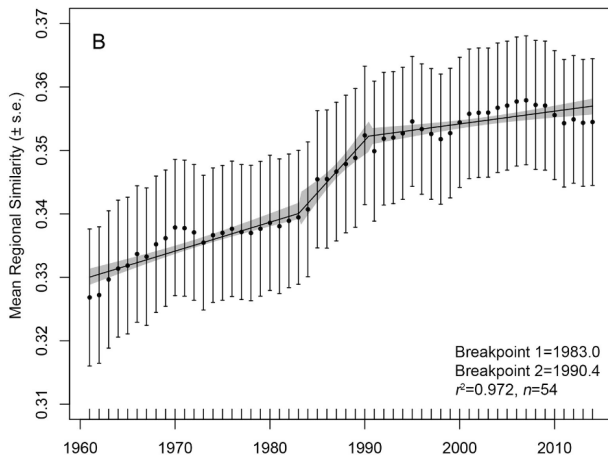
Ziesche et coll. (2023)

Déclin d'insectes en Allemagne



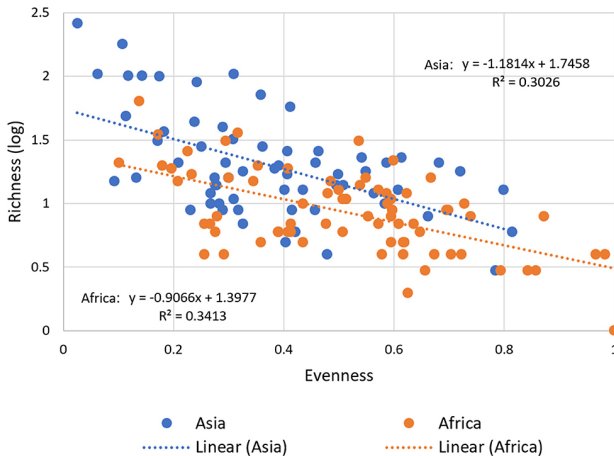
Gandara et al. (2024)

Similarité d'espèces cultivées entre régions du monde



Martin et coll. (2019)

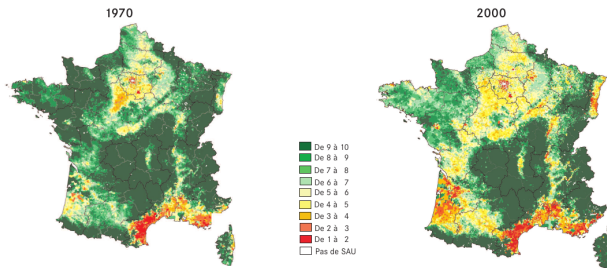
Moins de variétés sur plus de surface en Asie et Afrique



Gatto et coll. (2021)

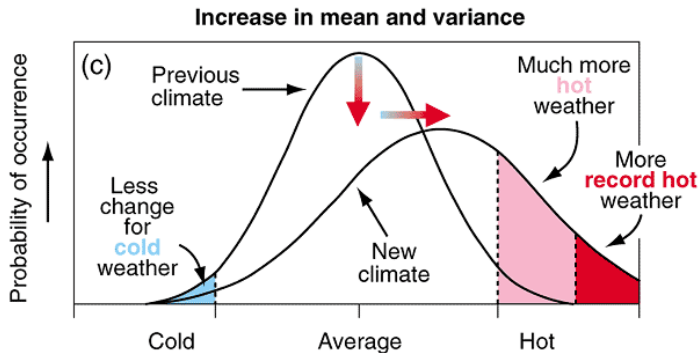
Homogénéisation paysagère en France

Figure 1 - Indicateur de diversité d'assolement par commune en 1970 et 2000



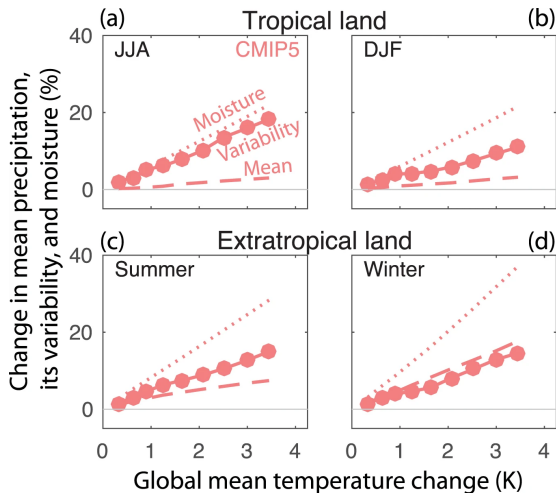
Source : données Agreste, recensements agricoles, méthode Solagro

Changement climatique en moyenne **et** variance



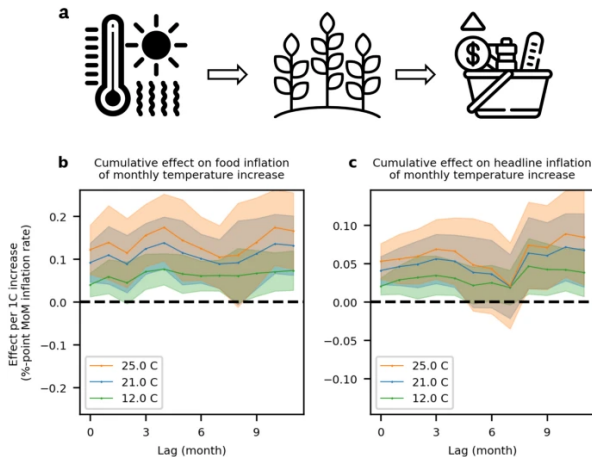
IPCC

Changement climatique en moyenne **et** variance



Pendergrass et coll. (2017)

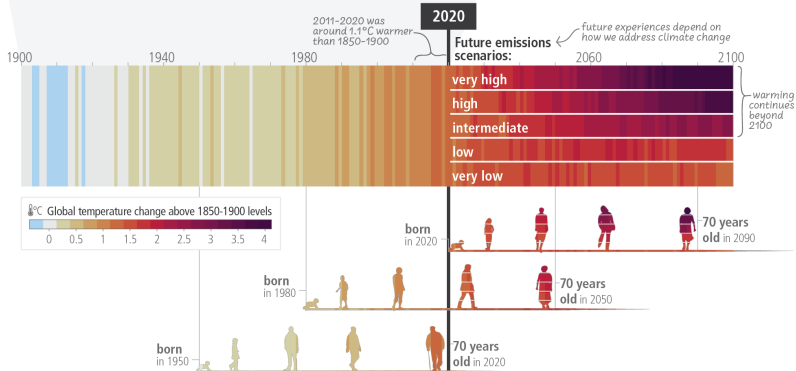
Impact sur l'inflation



Kotz et coll. (2024)

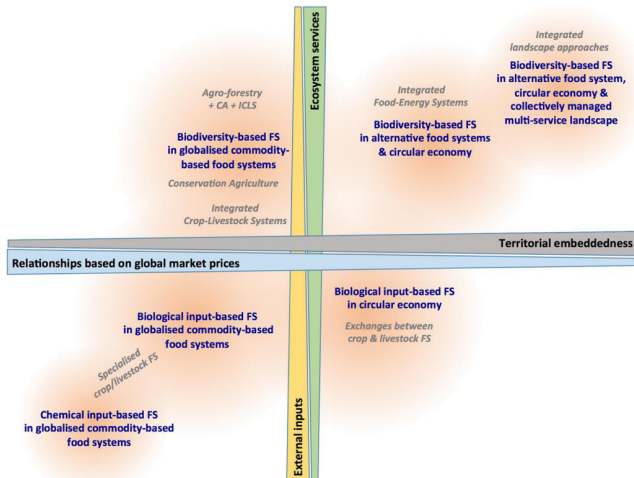
Urgence → adaptation et atténuation

c) The extent to which current and future generations will experience a hotter and different world depends on choices now and in the near-term



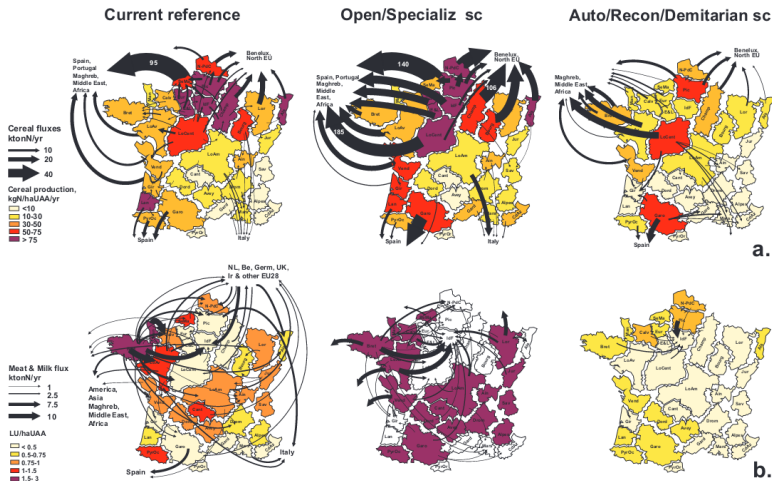
GIEC (2023)

Différents modèles d'agriculture possibles



Therond et coll. (2017)

Exemple de scénarios proposés pour la France



Billen et coll. (2018)

Le défi consiste à adapter les systèmes agricoles et alimentaires tout en atténuant leurs impacts négatifs.

En tant qu'étudiant.e.s ingénieur.e.s agronomes, comment vous positionnez-vous ? Quelle contribution aimeriez-vous fournir dans votre futur travail ?

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

Fronts de science et perspectives

Questions difficiles car différentes priorités et stratégies coexistent, sous-tendues par des *visions du monde* généralement implicites.

Questions difficiles car différentes priorités et stratégies coexistent, sous-tendues par des *visions du monde* généralement implicites.

Ce dont je vais vous parler n'est *qu'un exemple* de contribution possible, même s'il me tient évidemment à coeur.

Je souhaite surtout insister sur le fait que répondre à ce type de questions nécessite un minimum de connaissances en *sciences humaines sociales* (histoire, géographie, sociologie, économie, anthropologie, etc) pour être vigilant face aux raisonnements simplistes et trompeurs.

Critiques du *technological fix* appliquées aux biotech.

Technological fix : solution to a problem that results from reframing a social problem as a technological one

Critiques du *technological fix* appliquées aux biotech.

Technological fix : solution to a problem that results from reframing a social problem as a technological one

The judgment that these technological fixes provided a “solution” depends on who is defining the criteria for success and how they are defined.

Critiques du *technological fix* appliquées aux biotech.

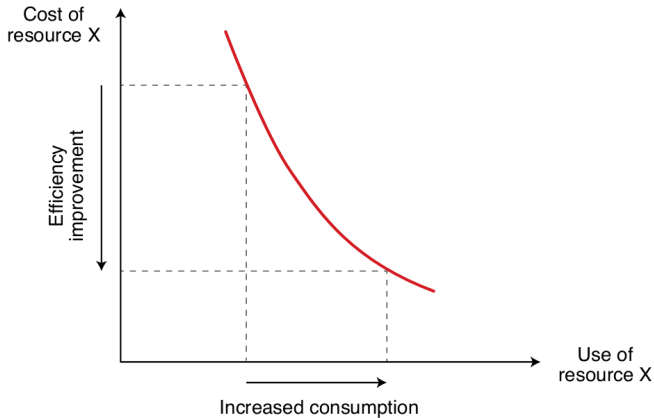
Technological fix : solution to a problem that results from reframing a social problem as a technological one

The judgment that these technological fixes provided a “solution” depends on who is defining the criteria for success and how they are defined.

Technological fixes only “solve” problems when framed narrowly in the manner of an engineering problem. When one takes a wider and longer view they tend to transform, relocate, or delay the problem—from this perspective “problems” are not solved.

Scott (2011)

Malédiction de l'efficacité

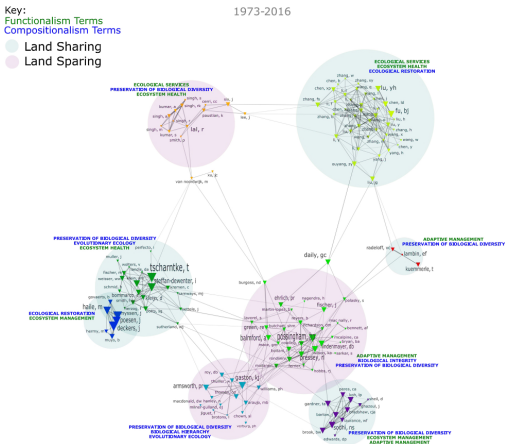


Hamant (2020)

Controversial *land sparing* vs *land sharing*

Loconto et coll. (2020) :

Two very different imaginaries about how humans do and should interact with nature [...] Truly political tools that can help to advance specific visions of the world



Postures de recherche

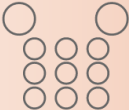
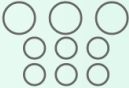
Epistemology Driving force Participation Axiology	Positivist Laws None Neutral		Interpretivist Agency Inclusive Engaged
Methodology Problematization Investigation	Preconceived Reductionist Hands-off		Adaptive Holist Transformative
Implementation Adoption Assessment	Instrumental Transfer Accountability		Emergent Sense-making Learning

Fig. 2 | Heuristic tool for discussing a research stance. The different choices which define a research stance are organized in three main fields: epistemology (the nature of the knowledge), methodology (the method of producing the knowledge) and implementation (the use to which the knowledge will be put).

Hazard et coll. (2020)

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

Fronts de science et perspectives

Une longue histoire

Year	Author	Title
1928	Bensin	Agroecological characteristics description and classification of the local corn varieties chorotypes ¹
1928	Klages	Crop ecology and ecological crop geography in the agronomic curriculum ²
1930	Bensin	Possibilities for international cooperation in agroecological investigations ²
1930	Friederichs	Die Grundfragen und Gesetzmäßigkeiten der land- und forstwirtschaftlichen Zoologie ¹
1938	Papadakis	Compendium on crop ecology
1939	Hanson	Ecology in agriculture ²
1942	Klages	Ecological crop geography ¹
1950	Tischler	Ergebnisse und Probleme der Agrarökologie ²
1956	Azzi	Agricultural ecology ¹
1965	Tischler	Agrarökologie ¹
1967	Hénin	Les acquisitions techniques en production végétale et leurs applications ²
1973	Janzen	Tropical agroecosystems ²
1976	INTECOL	Report on an International Programme for analysis of agro-ecosystems ³
1978	Gliessman	Memorias del Seminario regional sobre la agricultura agricola tradicional ³
1979	Cox and Atkins	Agricultural ecology: an analysis of world food production systems ¹
1981	Gliessman et al.	The ecological basis for the application of traditional agricultural technology in the management of tropical agroecosystems ²
1983	Altieri	Agroecology ¹
1984	Douglass (ed.)	Agricultural sustainability in a changing world order ¹
1987	Arrignon	Agro-écologie des zones arides et sub-humides ¹
1987	Conway	The properties of agroecosystems ²
1989a	Altieri	Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture ²
1990	Gliessman (ed.)	Agroecology: researching the ecological basis for sustainable agriculture ¹
1991	Caporali	Ecologia per l'agricoltura ¹
1995	Altieri	Agroecology: the science of sustainable agriculture (3rd edition) ¹
1997	Gliessman	Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture ¹
2003	Dalgaard et al.	Agroecology, scaling and interdisciplinarity ²
2003	Francis et al.	Agroecology: the ecology of food systems ²
2004	Clements and Shrestha (eds.)	New dimensions in agroecology ¹
2007	Gliessman	Agroecology: the ecology of sustainable food systems ¹
2007a	Warner	Agroecology in action: extending alternative agriculture through social networks ¹

Wezel et coll. (2009)

Quelques précurseurs (dans le monde académique)

Gliessman (1998) :

The application of ecological concepts and principles to the design and management of sustainable agroecosystems

Quelques précurseurs (dans le monde académique)

Gliessman (1998) :

The application of ecological concepts and principles to the design and management of sustainable agroecosystems

Altieri (1989) :

Agroecology can provide the ecological guidelines to point technological development in the right direction, but in the process, technological issues must assume their corresponding role within a strategy of rural development that incorporates social and economic problems.

Fondamentaux consensuels de l'agroécologie

- ▶ Interactions biotiques, processus d'auto-régulation et biodiversité au sein des agro-écosystèmes, plutôt qu'intrants de synthèse
- ▶ Economie et prudence dans l'utilisation des ressources non renouvelables
- ▶ Combiner connaissances et savoirs locaux, et connaissances scientifiques
- ▶ Combiner des actions à différentes échelles
- ▶ Soutenir les agriculteurs (plus spécifiquement) dans la conception d'un système agricole adapté à leur propre environnement

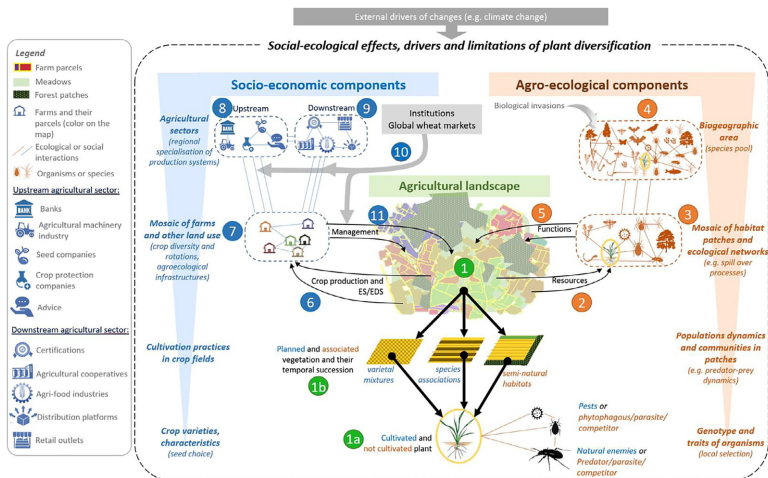
Adaptation d'une diapo de M. Cerf (2023)

Fondamentaux consensuels de l'agroécologie

- ▶ Interactions biotiques, processus d'auto-régulation et biodiversité au sein des agro-écosystèmes, plutôt qu'intrants de synthèse
- ▶ Economie et prudence dans l'utilisation des ressources non renouvelables
- ▶ Combiner connaissances et savoirs locaux, et connaissances scientifiques
- ▶ Combiner des actions à différentes échelles
- ▶ Soutenir les agriculteurs (plus spécifiquement) dans la conception d'un système agricole adapté à leur propre environnement

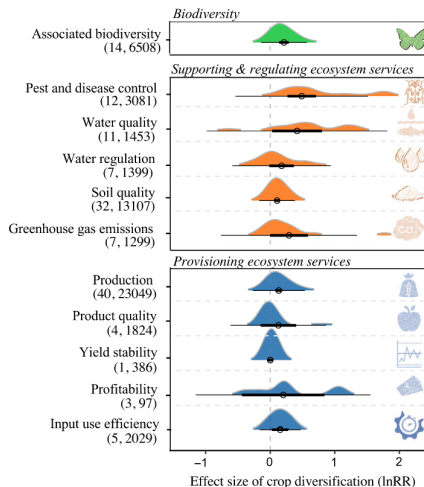
Adaptation d'une diapo de M. Cerf (2023)

Cadre conceptuel global



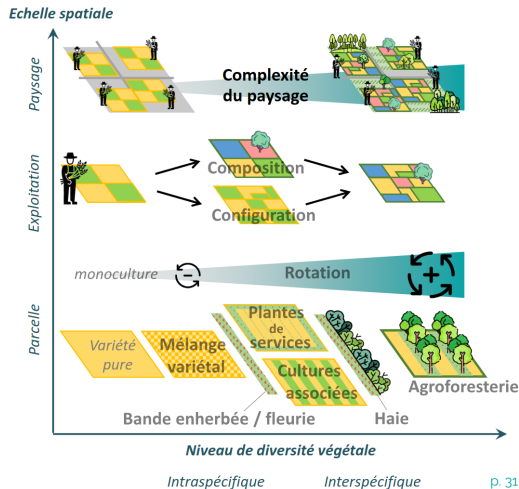
Vialatte et coll. (2022)

Avantages de la diversification en général



Beillouin et coll. (2021)

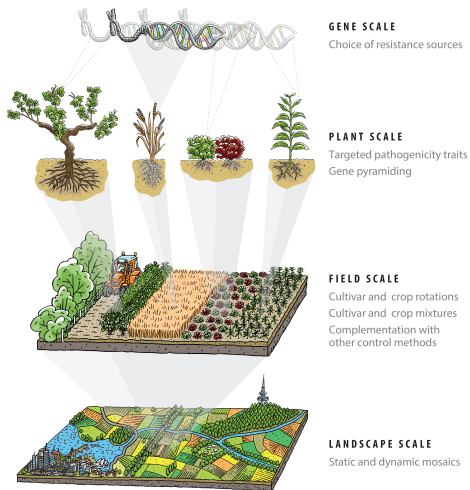
Echelles de diversification



p. 31

ESCo « Utiliser la diversité végétale des espaces agricoles pour favoriser la régulation naturelle des bioagresseurs et protéger les cultures » (2022)

Echelles de diversification



Rimbaud et coll. (2021)

Stratégie générale de minimisation du risque



Stratégie générale de minimisation du risque

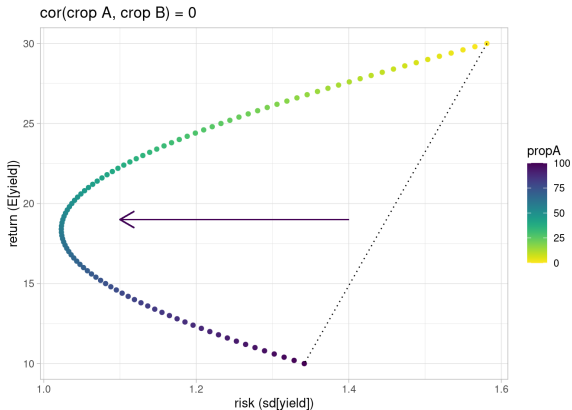
*In 1738, Bernoulli [...] recommended minimizing risk by spreading it across a set of independent events (**bet-hedging**).*

Stearns (2000)

Stratégie générale de minimisation du risque

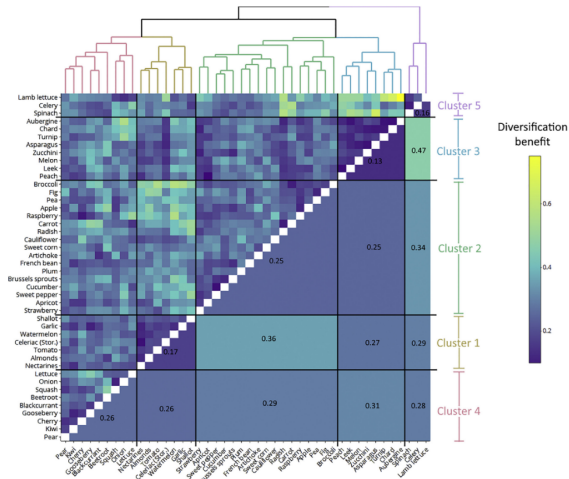
- ▶ Largement utilisée, notamment en finance
 - ▶ *modern portfolio theory* (Markowitz, 1952)
- ▶ Nombreuses recherches en écologie (p.ex. Tilman, 1999)
- ▶ Ex. d'application à l'agriculture :
 - ▶ **bouquet** : même ferme mais parcelles différentes
 - ▶ **mélange** (ou population) : même parcelle donc possibilité de plasticité phénotypique

Réduction du risque grâce à un bouquet de deux espèces



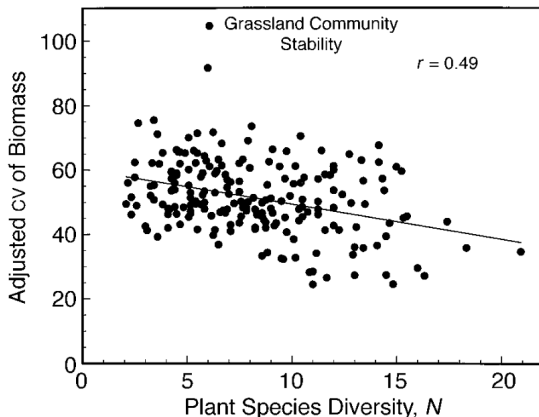
Adapté de Paut et coll. (2020)

Meilleure stabilité des bouquets d'espèces horticoles



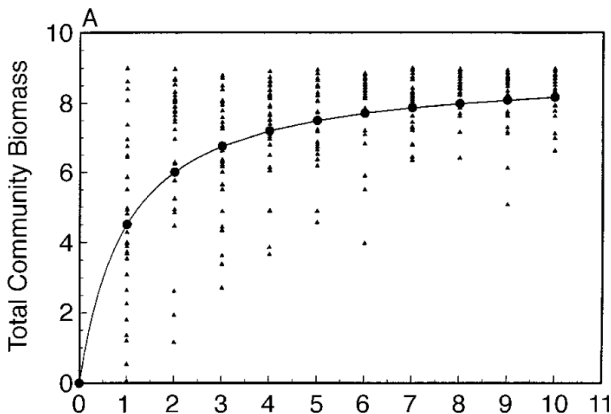
Paut et coll. (2020)

Meilleures stabilité et productivité des mélanges en prairie



Tilman (2019)

Meilleures stabilité et productivité des mélanges en prairie



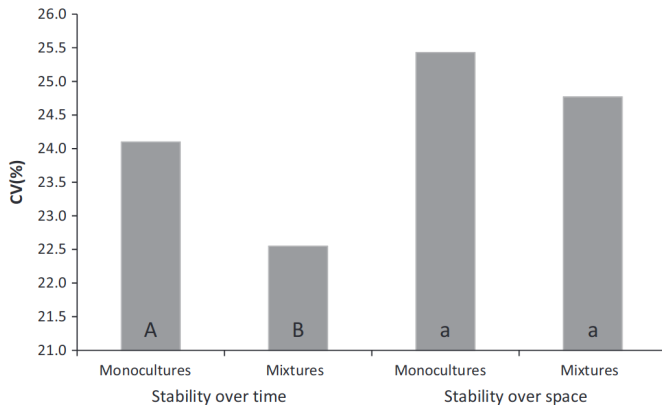
Tilman (2019)

Avantages des mélanges par rapport aux cultures pures

Mélanges de variétés	Niveau de réduction	Méta-analyse source
Rouille jaune du blé	28	Huang 2012
Septoriose du blé	11	Kristofersen 2020
Insectes polyphages	40	Snyder 2020; Tooker 2012
Mélanges d'espèces		
Champignons aériens	45	Zhang 2019; Boudreau 2013
Insectes polyphages	53	Risch 1983; Lithourgidis 2021
Adventices	58	Gu 2021

Adaptation d'une diapo de J.-B. Morel (2024)

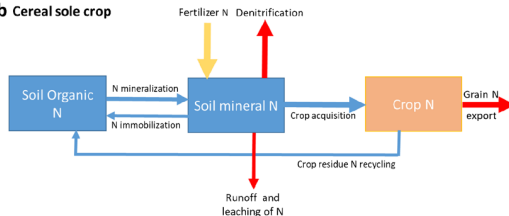
Avantages des mélanges par rapport aux cultures pures



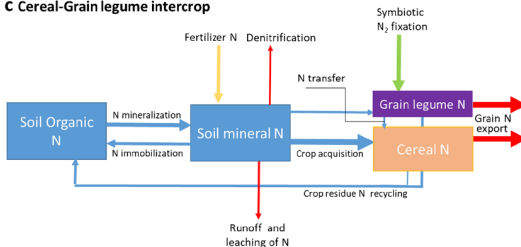
Reiss et Drinkwater (2018)

Avantages des mélanges par rapport aux cultures pures

b Cereal sole crop

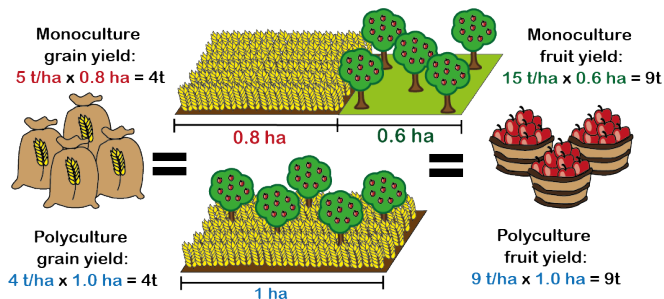


c Cereal-Grain legume intercrop



Jensen et coll. (2020)

Avantages des mélanges par rapport aux cultures pures

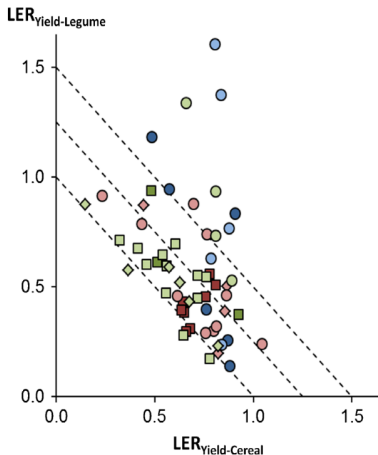


$$\text{LER} = \frac{4 \text{ t/ha}}{5 \text{ t/ha}} + \frac{9 \text{ t/ha}}{15 \text{ t/ha}} = 1.4$$

T. Kellner (2022)

Avantages des mélanges par rapport aux cultures pures

Yield land equivalent ratio for legume and cereal



Bedoussac et coll. (2015)

Importance de la semence, entité vivante

Kloppenburg (2004) :

Crop production is the necessary foundation upon which the complex structures of human society have historically been raised. And the seed is the irreducible core of crop production.

Torshizi et Clapp (2021) :

Control of the seed industry may result in control of the entire agrifood supply chain.

Importance de la semence, entité vivante

La sélection depuis des décennies :

- ▶ homogénéité intra-parcelle : toutes les plantes de la parcelle sont des clones génétiques
- ▶ itinéraires techniques tamponnant les variations environnementales avec des intrants de synthèse

Changements de pratique (E)

⇒ besoin d'évoluer dans l'espace phénotypique (P)

⇒ **besoin de généticien.ne.s et de sélectionneur.euse.s** pour explorer efficacement l'espace génétique (G)

Plan

Meta

Agriculture

Sélection humaine et génétique

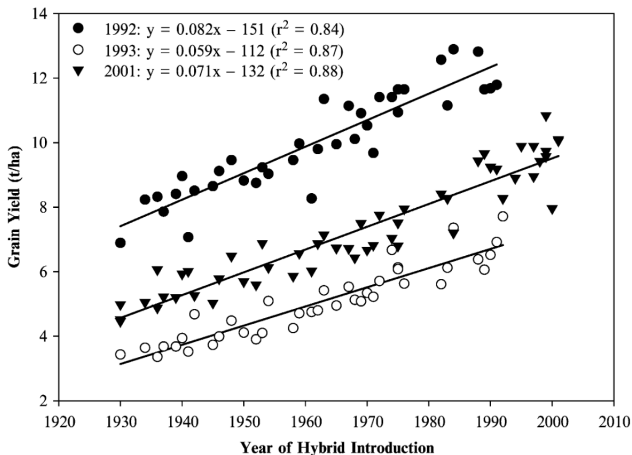
Défis actuels

Apparté

Agroécologie, diversification et mélanges

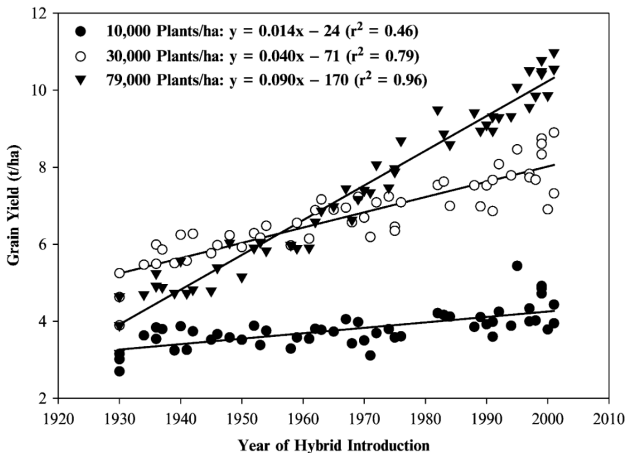
Fronts de science et perspectives

Retour sur l'exemple du gain génétique réalisé



Duvick (2005)

Retour sur l'exemple du gain génétique réalisé

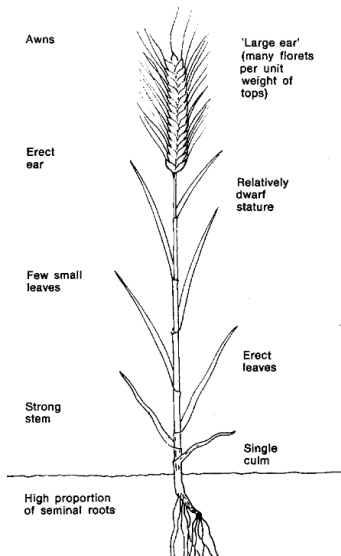


Duvick (2005)

L'idéotype de Donald

Donald (1968) :

[Full production] does not lie in the aggressiveness of the individual plant but in a high density of plants resistant to crowding.



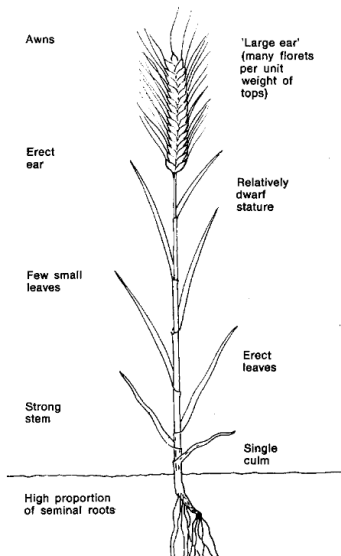
L'idéotype de Donald

Donald (1968) :

[Full production] does not lie in the aggressiveness of the individual plant but in a high density of plants resistant to crowding.

Voir aussi :

- ▶ Reymond et coll. (1994)
- ▶ Zhang et coll. (1999)



Compromis évolutifs (*evolutionary trade-offs*)

Denison (2015) :

Prior to domestication, natural selection had already tested many more alleles for stress tolerance and efficient use of solar radiation, nutrients, and water than plant breeders ever will.

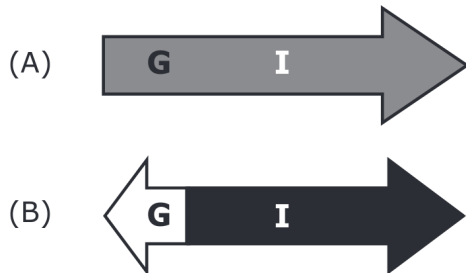
Compromis évolutifs (*evolutionary trade-offs*)

Denison (2015) :

Prior to domestication, natural selection had already tested many more alleles for stress tolerance and efficient use of solar radiation, nutrients, and water than plant breeders ever will.

I have therefore hypothesized that improving such traits through plant breeding has required and usually will require either radically different phenotypes (never tested by past natural selection) or accepting tradeoffs rejected by past natural selection.

Sélection individuelle vs sélection de groupe



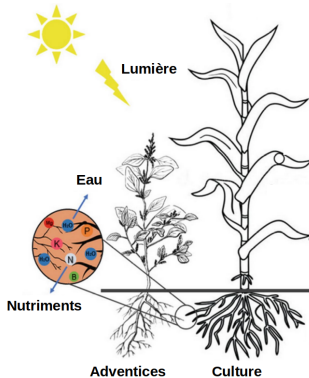
Trends in Plant Science

Figure 1. Two Evolutionary Scenarios for Selection at Two Levels. When group selection, G, and individual selection, I, are in the same direction (A), as they are in response to most abiotic factors, it is unlikely that plant breeding or genetic modification can improve upon what natural selection has achieved. When group and individual selection are in conflict (B) because of biotic interactions such as competition, individual selection is much stronger than group selection (arrow length). In this case it is possible for plant breeders and genetic engineers to find group solutions (e.g., increased population yield) that nature would not produce.

Weiner (2019)

Interactions plante-plante

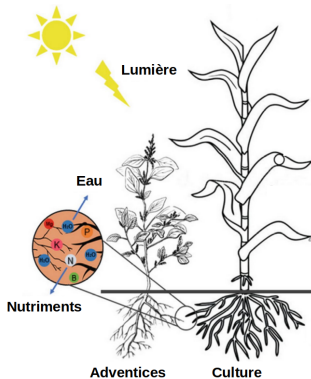
Indirectes et passives, via les ressources :



Adapté de da Silva et coll. (2022)

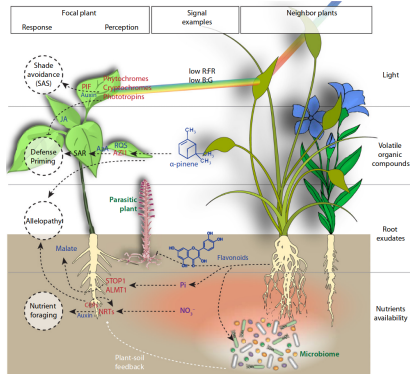
Interactions plante-plante

Indirectes et passives, via les ressources :



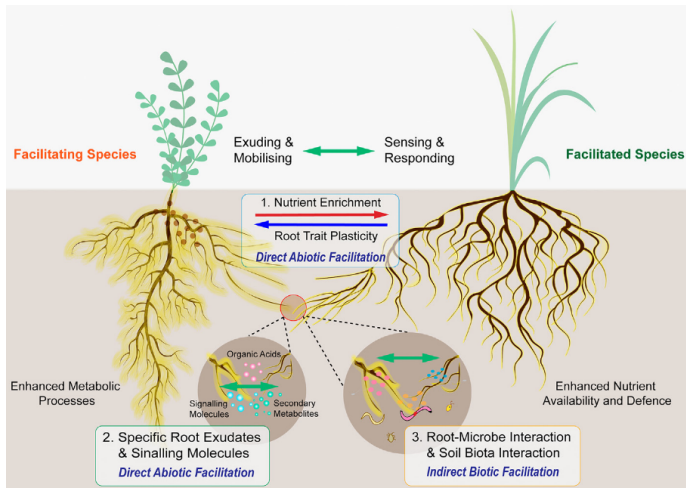
Adapté de da Silva et coll. (2022)

Directes et actives, via de la signalisation :



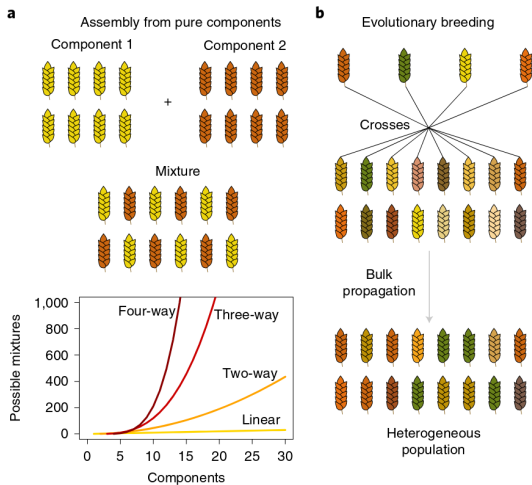
Subrahmaniam et coll. (2018)

Ex. de la facilitation à l'interface plante-sol



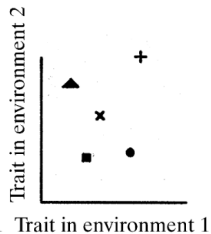
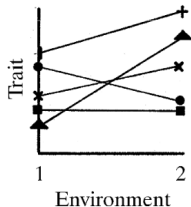
Yu et coll. (2021)

Explosion combinatoire



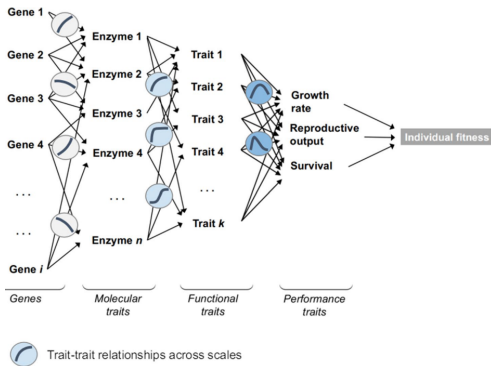
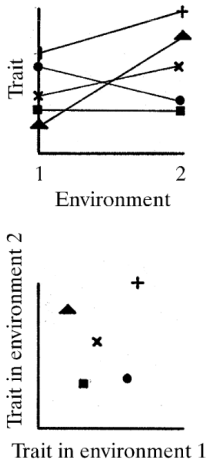
Wuest et coll. (2021)

Plasticité phénotypique, GxE et intégration multi-échelle



Guntrip et Sibly (1998)

Plasticité phénotypique, GxE et intégration multi-échelle



Vasseur et coll. (2022)

Guntrip et Sibly (1998)

Co-sélectionner pour co-adapter

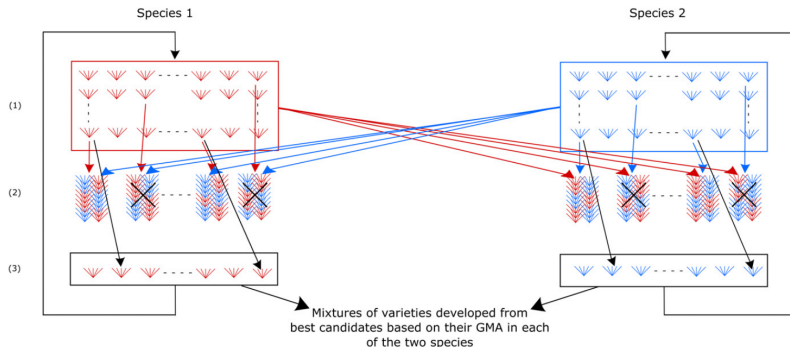


Figure 2 Parallel recurrent selections for General Mixture Ability (SGMA) in two species. (1): Populations of selection candidates at cycle n , (2): Experimental evaluation of mixtures of progeny families of selection candidates from one species with a bulk of all progeny families of candidates from the other species, (3): Recombination of the selected candidates.

Sampoux et coll. (2019)

Take-home messages

- ▶ Les conditions de culture sont de plus en plus variables et donc imprédictibles.

Take-home messages

- ▶ Les conditions de culture sont de plus en plus variables et donc imprédictibles.
- ▶ Si les politiques publiques la soutiennent, la diversification est un levier majeur de gestion des risques.

Take-home messages

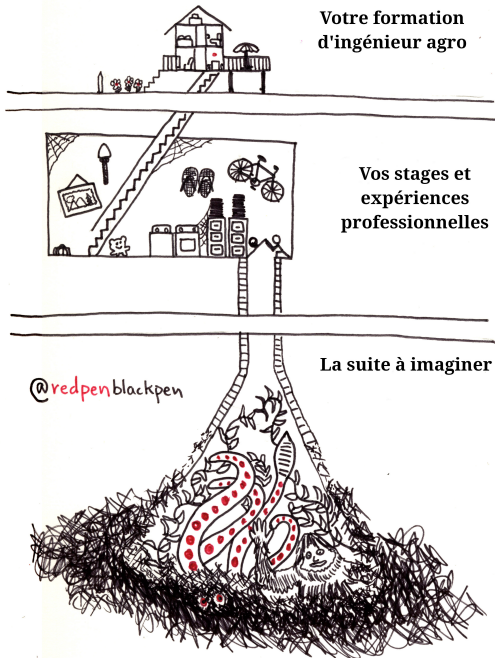
- ▶ Les conditions de culture sont de plus en plus variables et donc imprédictibles.
- ▶ Si les politiques publiques la soutiennent, la diversification est un levier majeur de gestion des risques.
- ▶ Lorsque le contexte agronomique change, les espèces doivent également évoluer.

Take-home messages

- ▶ Les conditions de culture sont de plus en plus variables et donc imprédictibles.
- ▶ Si les politiques publiques la soutiennent, la diversification est un levier majeur de gestion des risques.
- ▶ Lorsque le contexte agronomique change, les espèces doivent également évoluer.
- ▶ Des compétences en génétique et agroécologie sont nécessaires, associées à un intérêt pour les expérimentations au champ, la modélisation et les questions agricoles et alimentaires.

Vandermeer and Perfecto (2017) :

*We advocate for the encouragement of scientifically oriented agroecological promoters to **take seriously advanced training** in sciences such as chemistry, and plant physiology, but most importantly, modern **ecology and mathematics**.*



Remerciements

P. Gérard et S. Ben Sadoun d'AgroParisTech de m'avoir invité à présenter aujourd'hui.

Les collègues de mon unité GQE – Le Moulon avec qui j'échange au quotidien, ainsi que les membres de projets interdisciplinaires tels que MoBiDiv avec qui j'ai la chance de travailler.

Financements : INRAE, ANR, Min.Agri.