

Modèle et Inférence Statistique
pour la
Dynamique Spatio-Temporelle
de la
Tavelure en Vergers de Pommiers

R. Senoussi ^{*}, C. Gros ^{**}, L. Parisi ^{**}

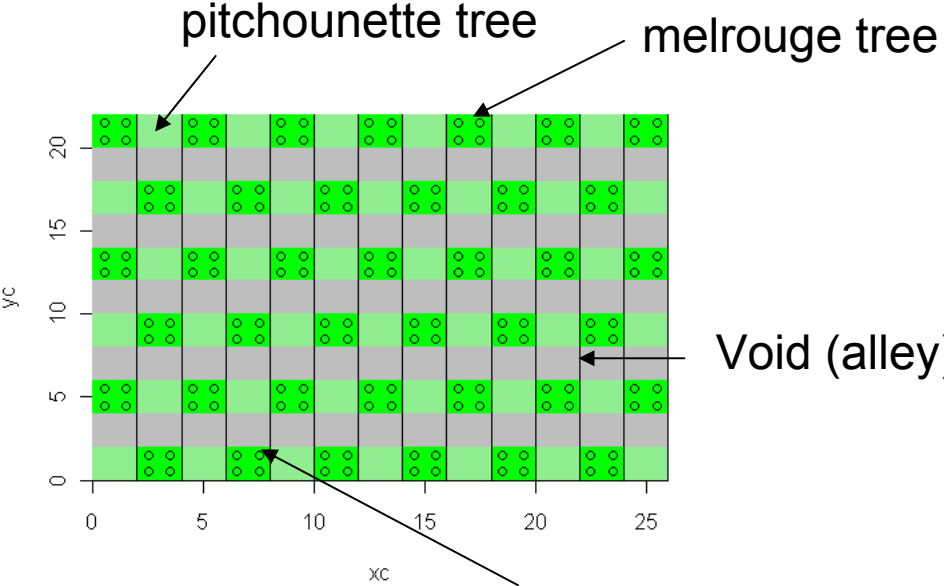
Inra, ^{*} Centre d'Avignon

^{**} Gotheron

Introduction

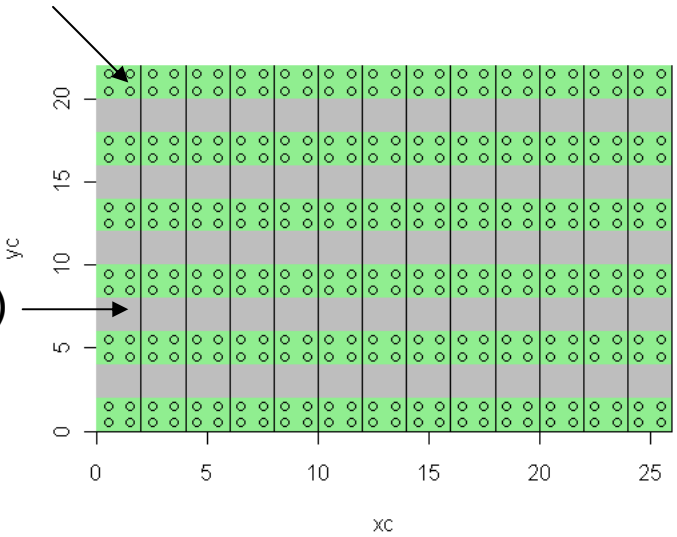
- Experimental essay in 9 contiguous apple orchards
 - 2 types of orchards
 - Pure : only susceptible cultivars (melrouge variety) : 3 orchards
 - Mixture of susceptible and resistant cultivars (pitchounette) : 6 orchards
 - Period: season 2006 [may 30 - july 24]
 - Pest: apple scab caused by
ascomycete fungus: *Venturia inaequalis*
 - Aim:
 - Describe and statistically infer epidemiologic parameters of apple scab
 - Question: How much mixture plantation affect scab dynamics?

Pure and mixed orchards



a quarter of a melrouge tree

Mixed orchard



Void (alley)

Pure orchard

experimental design (1996)

Gotheron (Drôme, 26) AB 04

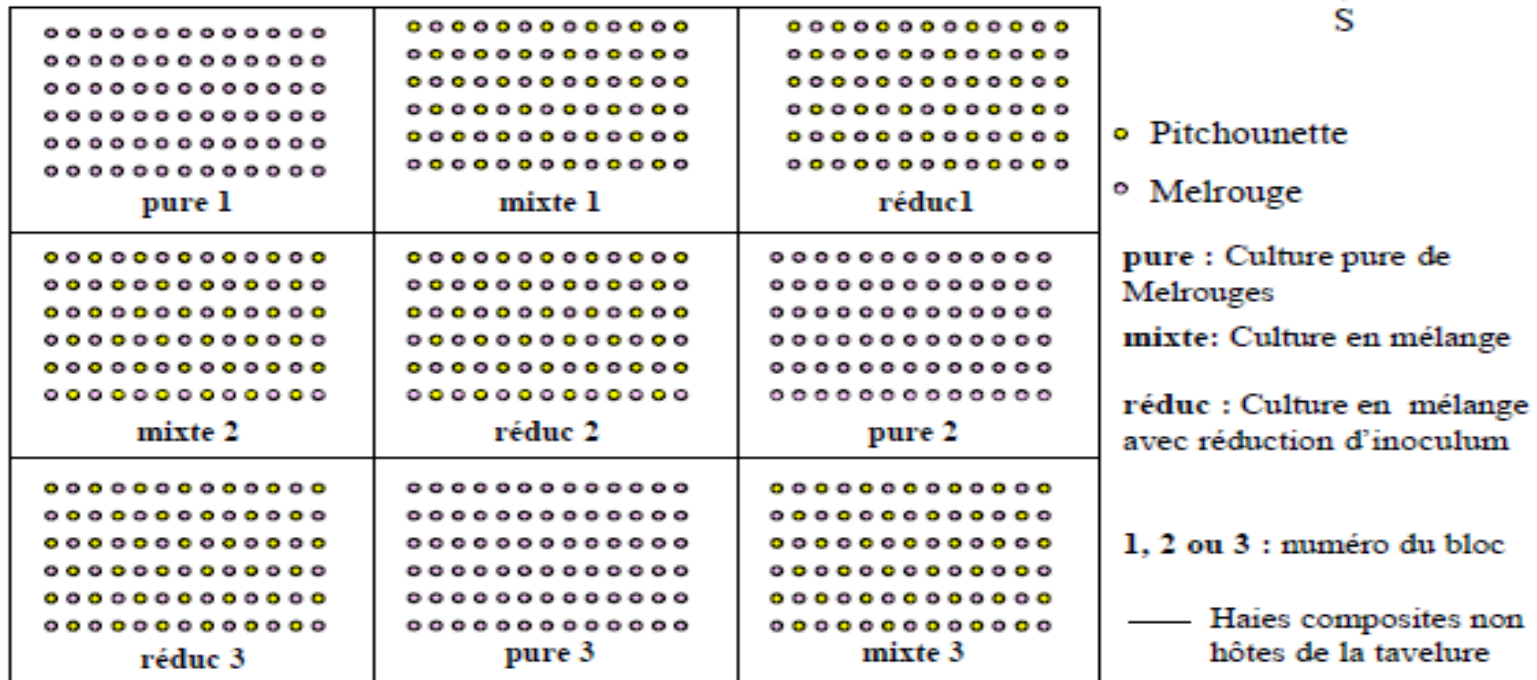
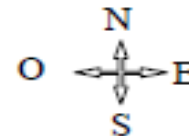


Figure 8 : Plan schématique de la parcelle expérimentale AB04

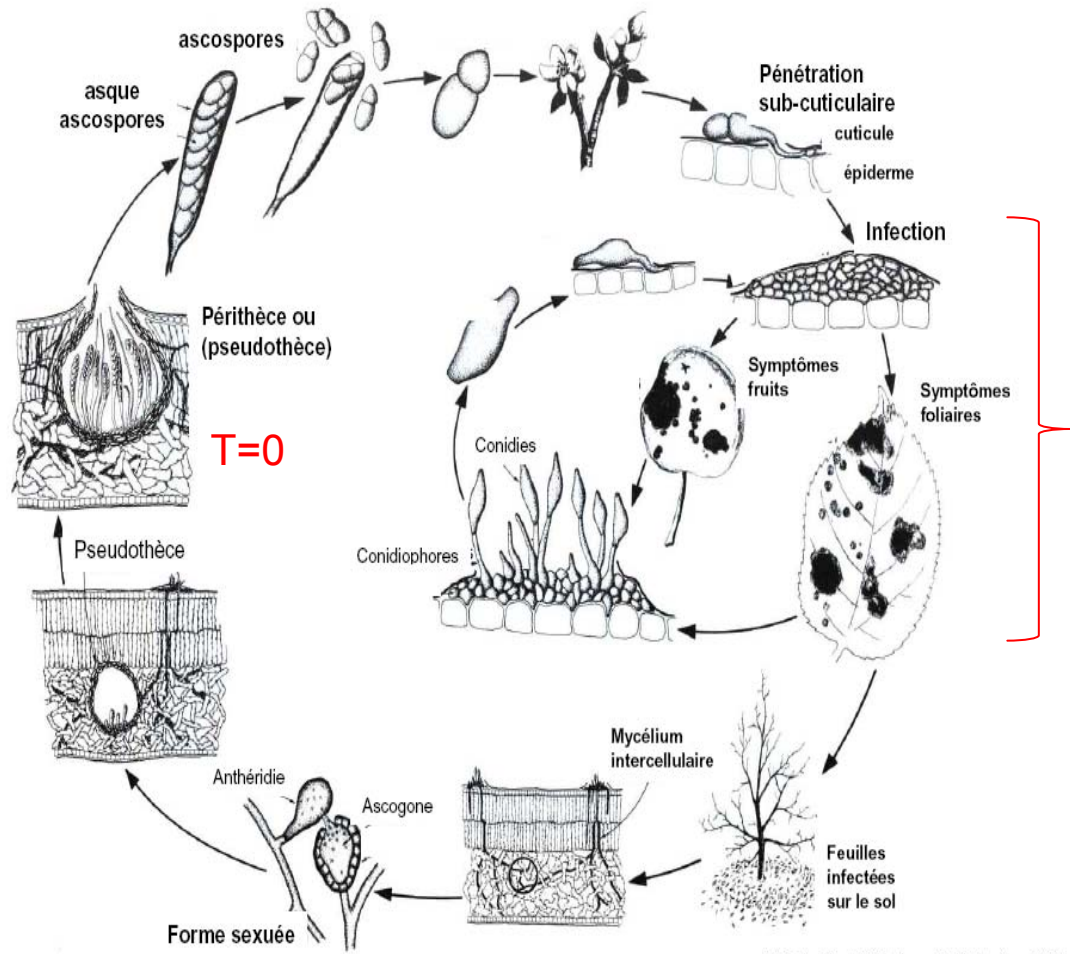
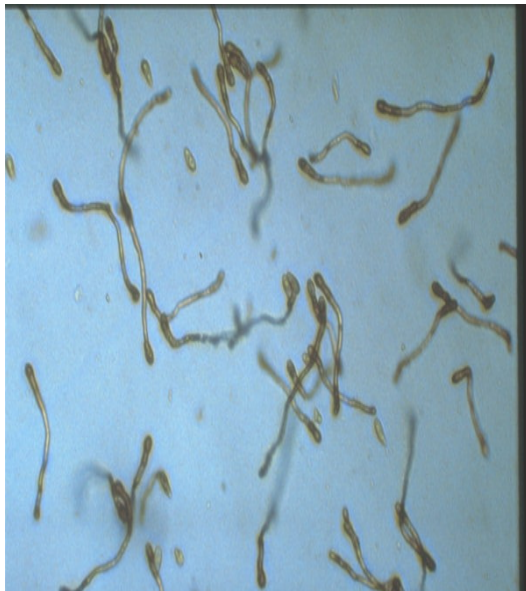
ascomycete fungus: *Venturia inaequalis*



Figure 9 : Une pousse inoculée ensachée (Photo D.SIMON)




Venturia inaequalis Cycle



Tiré de Plant Pathology, G.N. Agrios, 1988

A data *driven* model Assumptions

1. Orchards were distant and separated by hedges:
 - > **Statistical independence of orchards**
 - > But underwent the same dispersal mechanisms with same set of parameters
2. Space heterogeneity: void (alleys), sensible and resistant locations affect spore diffusion:
 - > Resistivity to displacement /dispersal :
definition of an **epidemiological “distance”** between locations
3. The measurement scales  **Discretisation**
 - > spatial locations : $\sim 1 \text{ m}^2$ (tree quarter), (total 150 trees)
 - > time unit : 1 day (total 115 days)
4. Fungus dispersal took place only during favorable climatic conditions :
 - > Calendar time inessential :
time weighted by a susceptibility index to infection
definition of a **discrete epidemiological time**
5. Randomness of observation times: actually depended on climatic conditions and worker readiness : should be considered as Markovian times (stopping times)

example of data sheet collected in a mixed orchard

date	day	row	col	loc	leaves	spot_nb1	croxal1	spot_nb2	croxal2	spot_nb3	croxal3
13-juin	74	2	5	SO	1	2	1	0	0	0	0
13-juin	74	4	7	NE	1	1	1	0	0	0	0
20-juin	81	3	12	NE	2	1	1	3	1	0	0
20-juin	81	3	12	NE	1	1	1	0	0	0	0
04-juil	95	3	2	NO	1	1	1	0	0	0	0
04-juil	95	3	12	NE	2	1	1	3	1	0	0
04-juil	95	6	3	SE	1	2	2	0	0	0	0
04-juil	95	3	12	SE	2	6	4	1	1	0	0
24-juil	105	1	4	NE	1	1	1	0	0	0	0
24-juil	105	2	3	SE	1	13	2	0	0	0	0
24-juil	105	3	8	SO	1	20	2	0	0	0	0
24-juil	105	3	12	SO	3	2	1	2	1	2	1
24-juil	105	4	9	NE	1	8	2	0	0	0	0
24-juil	105	4	7	NE	1	14	1	0	0	0	0
24-juil	105	4	7	NE	3	28	3	9	1	20	2
24-juil	105	4	7	NE	1	1	1	0	0	0	0
24-juil	105	6	3	SO	1	2	1	0	0	0	0

Orchard statuses at 3 dates

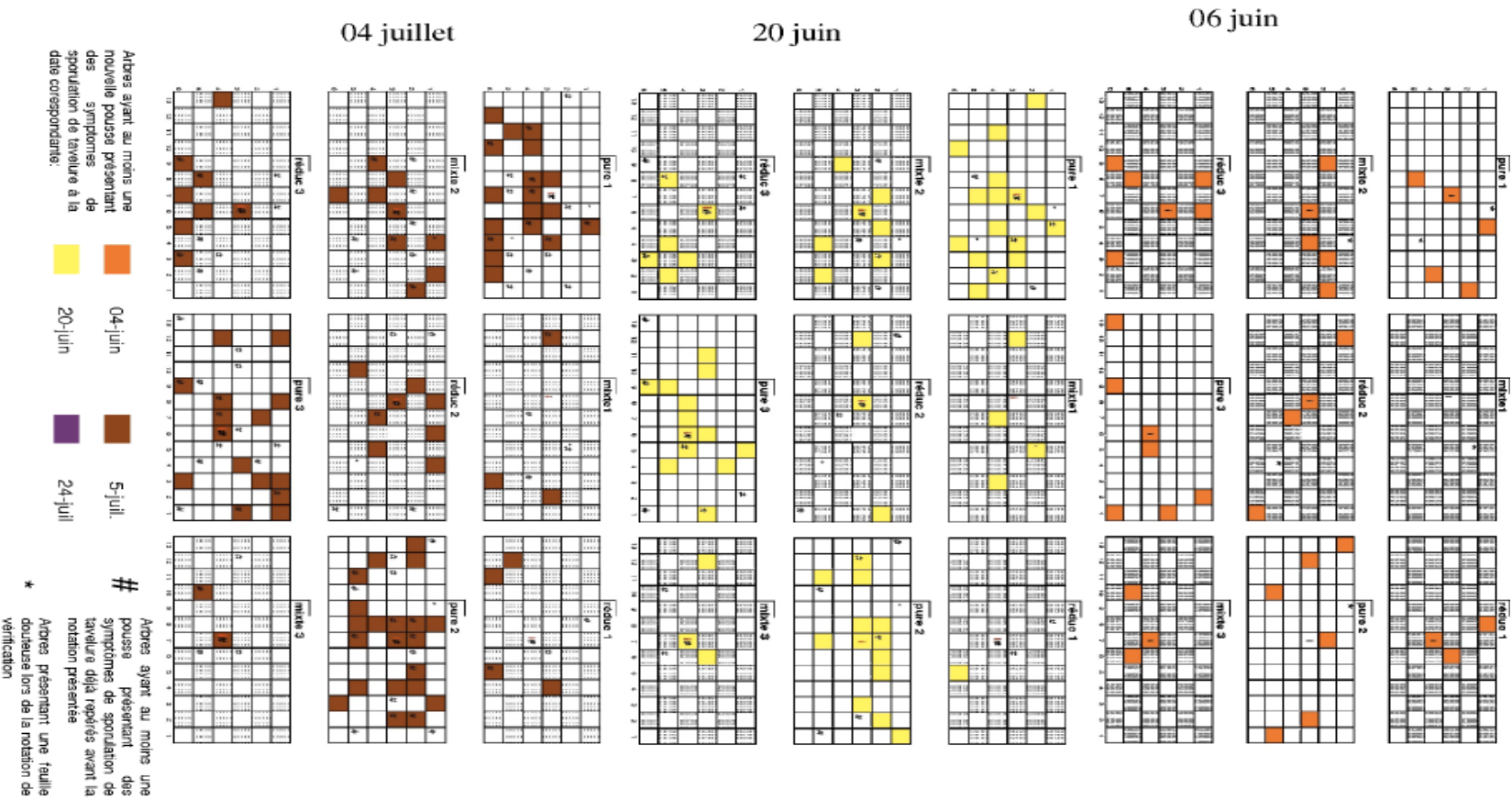
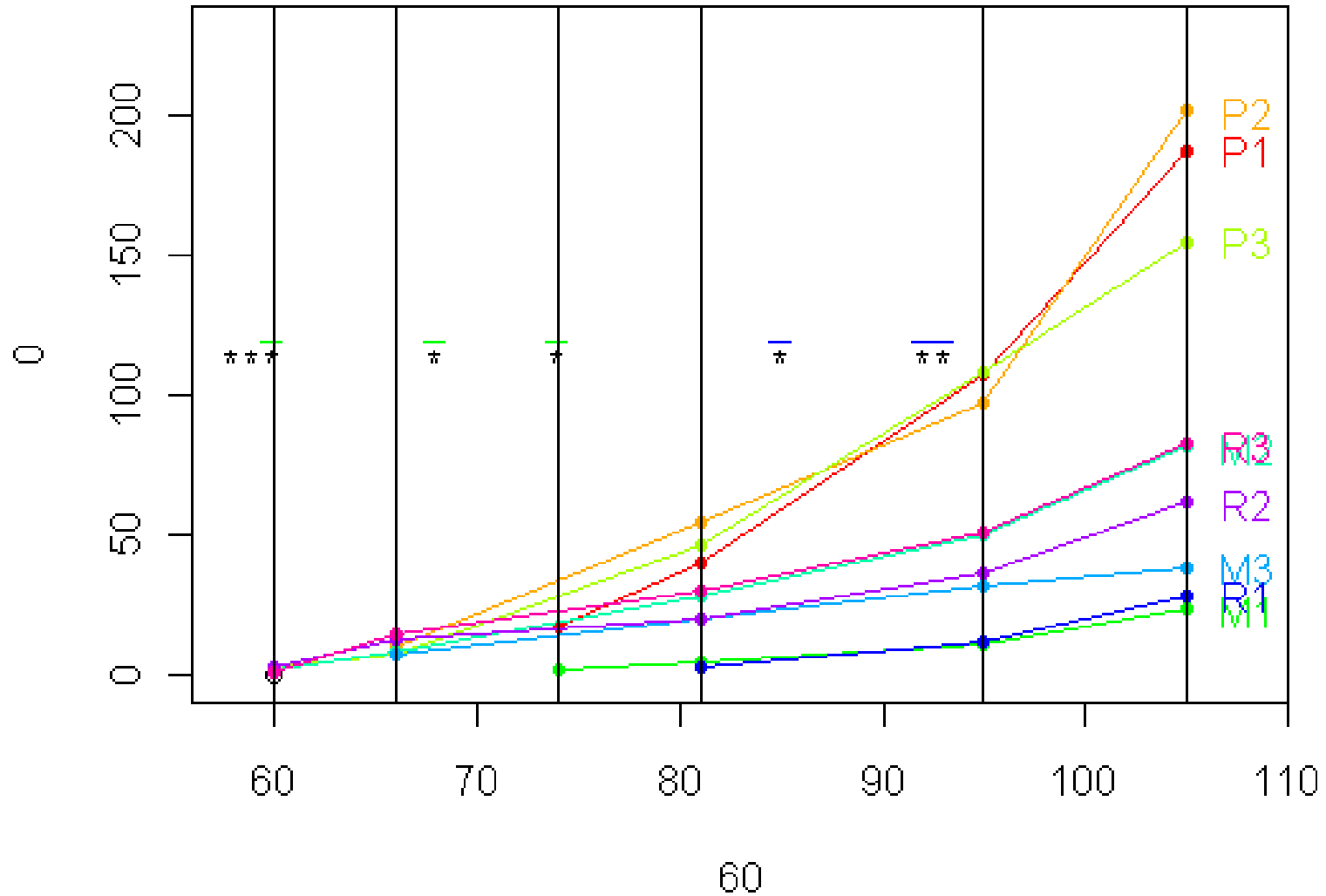


Figure 18 : Schéma d'évolution spatiale des arbres touchés par l'épidémie de tavelure.

Cumulative counts of infected leaves for the 9 orchards



Epidemiologic space-time

1. Space: divided into cells C_j with dispersal resistivity ρ :
 $\rho(\text{void=reference}) = \rho = 1$, $\rho(\text{susceptible}) = \rho_s$ and $\rho(\text{resistant}) = \rho_r$
Pseudo distance between locations X and Y:

$$D(X, Y) = \|Y - X\| \int_0^1 \rho(X + t(Y - X)) dt \approx \sum_{\text{cells } C_j: C_j \cap [X, Y] \neq \emptyset} \rho(C_j) \|C_j \cap [X, Y]\|$$

2. Time: only at risk periods weighted by a susceptibility coefficient μ
(ecophysiology behavior of *Venturia inaequalis*) were counted ;

$$\tau(s, t) = \int_s^t \mu(u) du \approx \sum_{s < j \leq t} \mu(j)$$

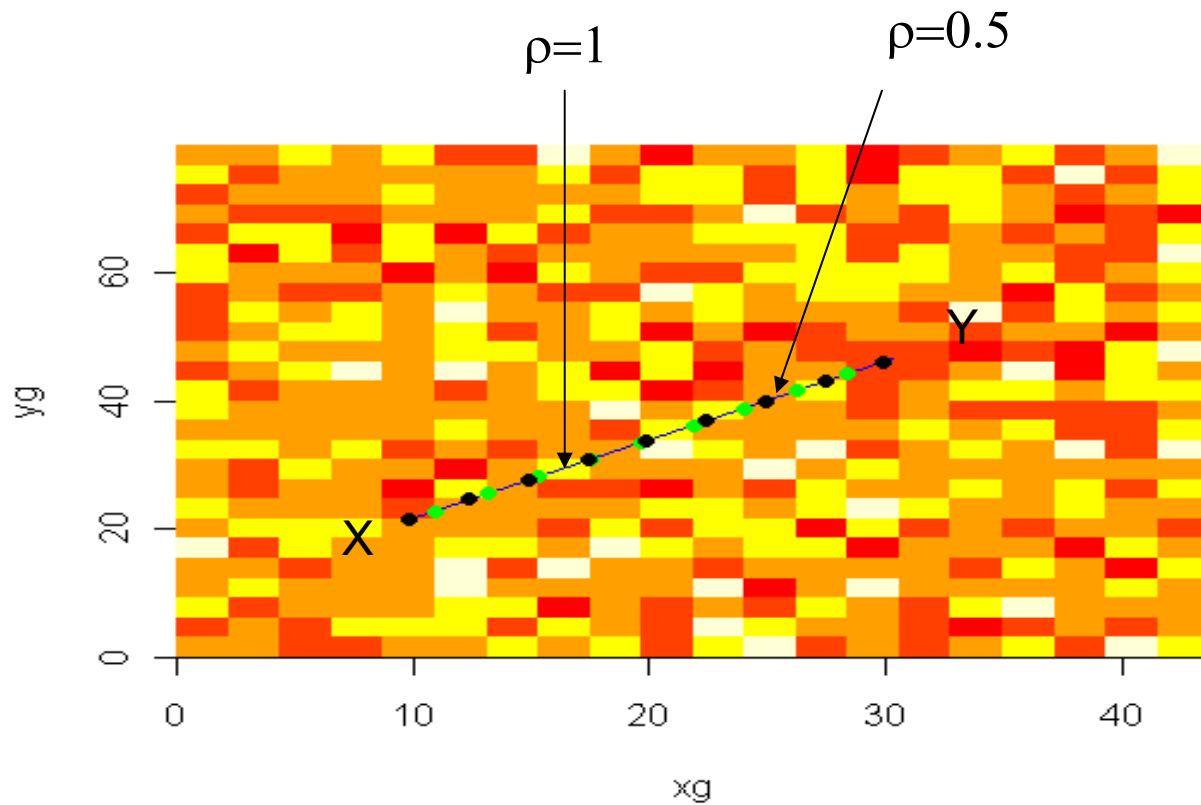
```
dates_obs <- c(60,66,74,81,95,105)
```

Dispersal resistivity/epidemiological contiguity

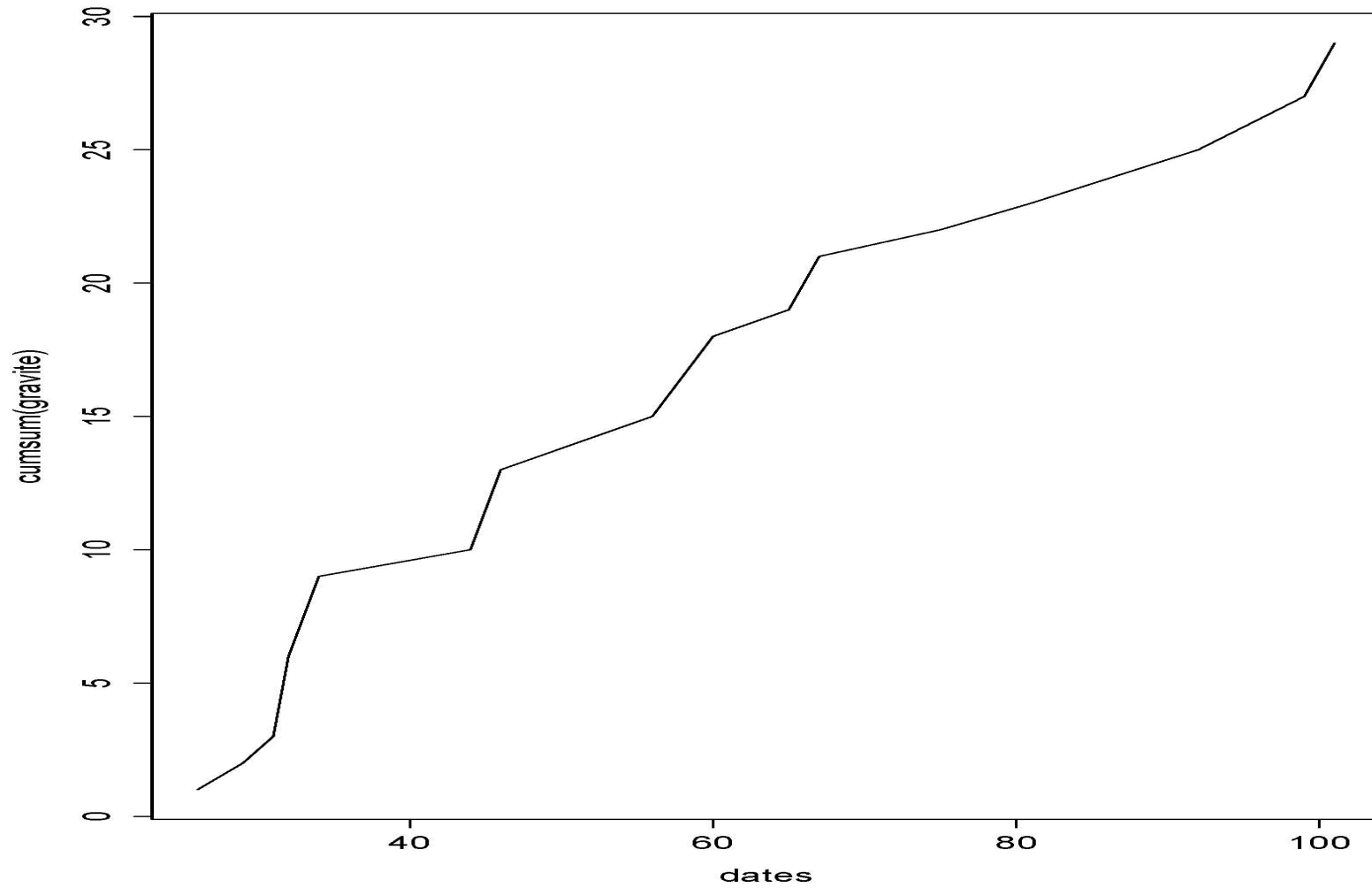
Simulated example:

Euclidean distance $D_{\text{euc}}(X,Y)=32.73483$

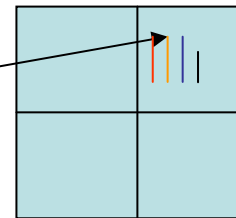
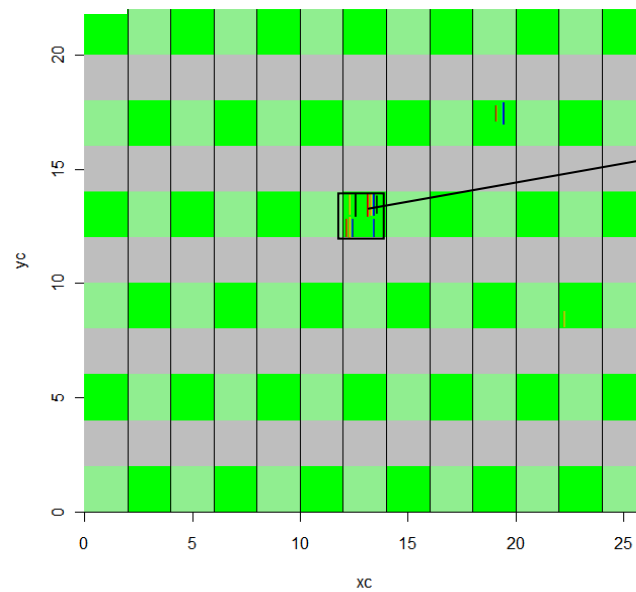
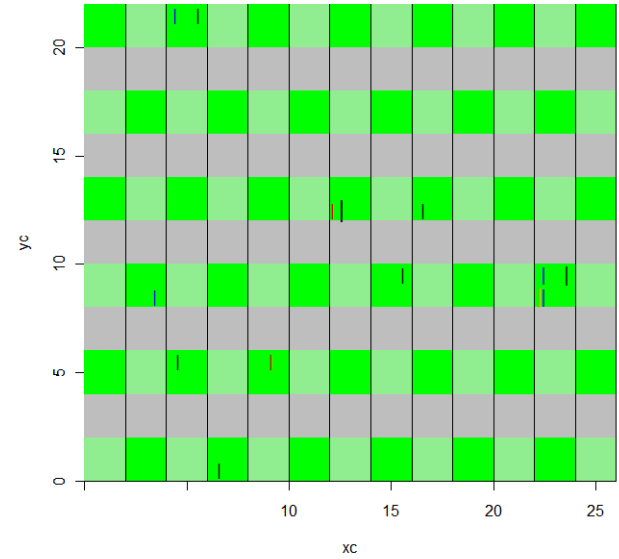
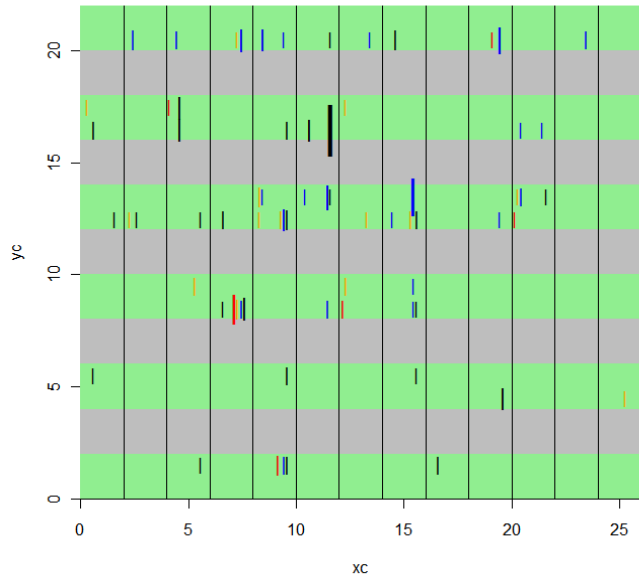
Epidemiological distance $D_{\text{epi}}(X,Y)=73.61998$



correspondance temps réel/temps à risque épidémio



Pure and mixed orchards



Nb of infected leaves in
a tree quarter at 4
observation dates

Statistical model

Assumptions

- **Additive** and **independent** instantaneous effect of infected spots for epidemy
- Senescence of infected leaves after 30 days
- **Markovian** behavior in time
- **Multiplicative effect** of epidemiologic time on the intensity process
- **Exponential decrease** of spore dispersal in epidemiological space

- Number of infected leaves in cell C_i due to the N_k infected leaves of cell C_k during a laps
Of time ΔT is **Poisson distributed** with mean $\lambda(C_i, C_k, N_k, \Delta T | \theta)$

likelihood for one orchard

$$\prod_{\text{time } \tau_j} \prod_{\text{susceptible cells } C_k} \frac{\exp^{-\lambda(\tau_j, C_k, N(\tau_{j-1}))} \lambda^{N(\tau_j, C_k)} (\tau_j, C_k, N(\tau_{j-1}))}{N(\tau_j, C_k)!}$$

$$\lambda(\tau_j, C_k, N(\tau_{j-1}) | \theta) = \left(\exp^{\alpha_{\text{base}}} + \sum_{p: N(\tau_{j-1}, C_p) \neq 0} \exp^{\alpha_{\text{leaf}} - D_{\text{epi}}(C_k, C_p | \alpha_{\text{void}}, \alpha_{\text{mel}}, \alpha_{\text{pich}})} \right) \exp^{\alpha_{\text{time}} (\tau_j - \tau_{j-1})}$$

$$\text{where } \theta = (\alpha_{\text{base}}, \alpha_{\text{leaf}}, \alpha_{\text{time}}, \alpha_{\text{void}}, \alpha_{\text{mel}}, \alpha_{\text{pich}})$$

$$\text{and } D(C_k, C_l | \alpha_{\text{void}}, \alpha_{\text{mel}}, \alpha_{\text{pich}}) = \alpha_{\text{void}} D_{\text{void}}(C_k, C_l) + \alpha_{\text{mel}} D_{\text{pel}}(C_k, C_l) + \alpha_{\text{pich}} D_{\text{pich}}(C_k, C_l)$$

Résultats statistiques

Coefficients:

- | | Estimate | Std. Error | z value | Pr(z) |
|---|--|------------|----------|---------------|
| • | | | | |
| • | α_1 : -3.166232 | 0.105936 | -29.8881 | < 2.2e-16 *** |
| | <i>intensité de base(immigration ou milieu ambiant, indpte du site et du climat)</i> | | | |
| • | α_2 : -1.697118 | 0.121523 | -13.9654 | < 2.2e-16 *** |
| | <i>intensité locale ou ponctuelle d'un foyer</i> | | | |
| • | α_3 : 0.069130 | 0.014627 | 4.7260 | 2.289e-06 *** |
| | <i>portée de la dispersion spatiale d'un foyer (distance spatiale)</i> | | | |
| • | α_4 : 0.374201 | 0.078995 | 4.7370 | 2.169e-06 *** |
| | <i>importance du climat (cumul jour des gravités)</i> | | | |
| • | α_5 : 0.920280 | 0.173068 | 5.3175 | 1.052e-07 *** |
| | <i>résistivité au déplacement des spores d'une cellule melrouge</i> | | | |
| • | α_6 : 2.469804 | 0.237998 | 6.2119 | 2.815e-08 *** |
| | <i>résistivité au déplacement des spores d'une cellule pitchounette</i> | | | |
| • | Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | |
| • | | | | |
| • | -2 log L: | 4165.48 | | |

Résultats, suite 2

- **Intensité ambiante** ou aléa impondérable (quart d'arbre)

$$\exp(\alpha_1) = \exp(-3.16) = 0.042$$

- **Effet temporel et climatique** (temps épidémiologique)

Contribution multiplicative exponentielle du temps

$$\exp(\alpha_3 * \text{temps}) = \exp(0.069 * 1) = 1.071576 \quad (\text{risque jour}=1)$$

$$\exp(\alpha_3 * \text{temps}) = \exp(0.069 * 6) = 1.514038 \quad (\text{risque jour}=6)$$

- **Effet milieu pour la dispersion spatiale**

- **1- Contribution locale** à l'infection (distance = 0)

$$\exp(\alpha_2) = \exp(-1.697) = 0.183$$

- **2- Construction de la distance épidémiologique**

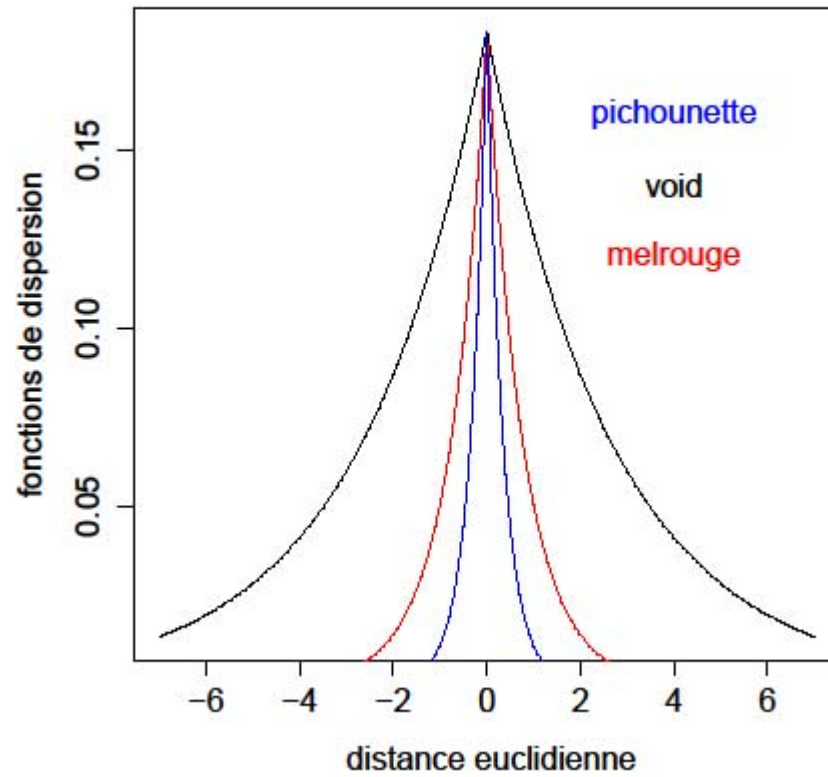
1 mètre euclidien équivaut à:

$$\alpha_{\text{void}} = \alpha_4 = 0.374 \text{ mètre épidémiologique en milieu vide}$$

$$\alpha_{\text{mel}} = \alpha_4 + \alpha_5 = 1.294 \text{ mètre épidémiologique en milieu melrouge (sensible)}$$

$$\alpha_{\text{pit}} = \alpha_4 + \alpha_6 = 2.844 \text{ mètre épidémiologique en milieu pichounette (résis)}$$

Courbes de dispersion selon le milieu



Interprétations- Extensions

- Il y a bien un apport extérieur ambiant pour la tavelure
 - L'effet local (à l'échelle d'un quart d'arbre est bien mesuré
 - La comptabilité d'un temps épidémiologique n'est pas absurde au vu des résultats
 - La construction d'une distance épidémiologique est cohérente avec les résultats attendus
 - Importance des vergers mixtes: On distingue bien les 3 composantes de l'espace (vide, sensibles, résistantes) et donc l'intérêt de vergers mixtes et qui ne traduit pas simplement un simple rapport de proportionnalité dû au nombre d'arbres sensible par verger.
-
- Un simulateur de dynamique sur les parcelles...
 - D'autres modèles avec d'autres fonctions et d'autres formes d'actions/interaction des différentes composantes)