

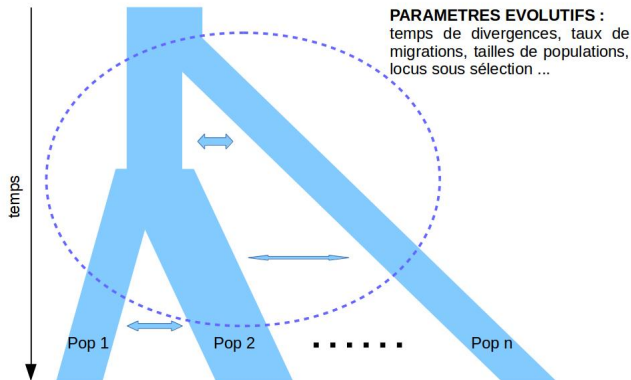
# Coalescence : principe et bases théoriques

Simon Boitard

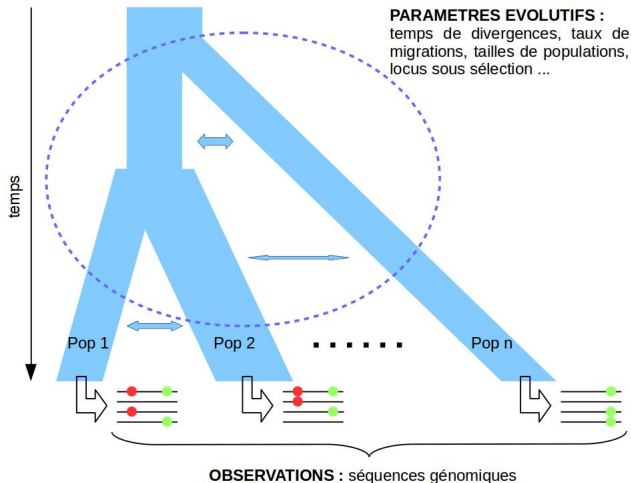
INRA, GenPhySE, Toulouse

M2 BBS, Atelier Génétique Statistique, 2017-2018

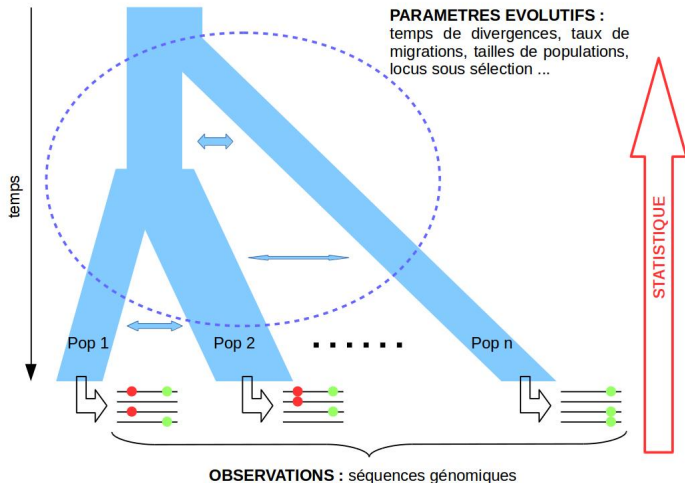
**Reconstruction de l'histoire évolutive** à une échelle de temps courte (intra-espèce) à partir de **données génomiques**.



**Reconstruction de l'histoire évolutive** à une échelle de temps courte (intra-espèce) à partir de **données génomiques**.



**Reconstruction de l'histoire évolutive** à une échelle de temps courte (intra-espèce) à partir de **données génomiques**.

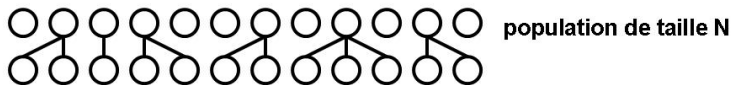


- Modèle mathématique permettant de décrire / simuler la généalogie d'un échantillon de séquences d'ADN (ou individus haploïdes).
- Outil pour comprendre l'influence du processus évolutif sur la diversité génétique.
- On **remonte** le temps au lieu de le descendre.
- Article fondateur de Kingman en 1982, très utilisé depuis.

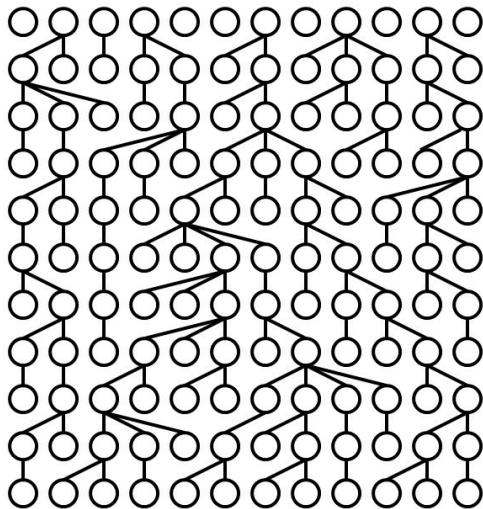
# Modèle de Wright-Fisher pour un locus sans recombinaison

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ population de taille N

# Modèle de Wright-Fisher pour un locus sans recombinaison



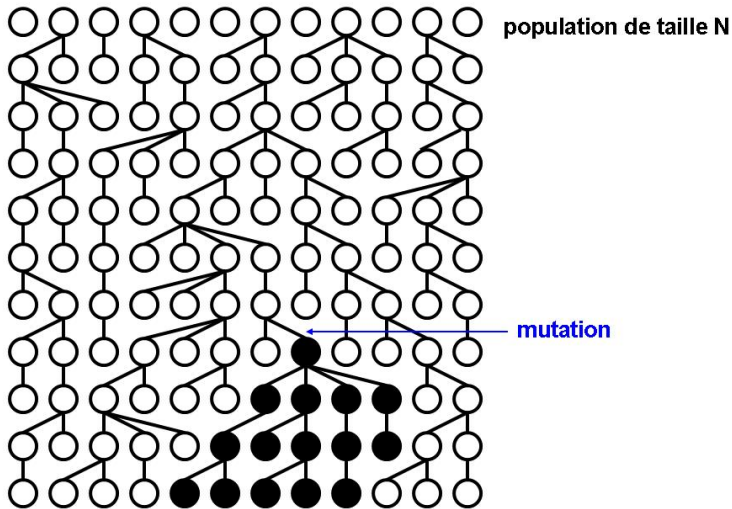
# Modèle de Wright-Fisher pour un locus sans recombinaison



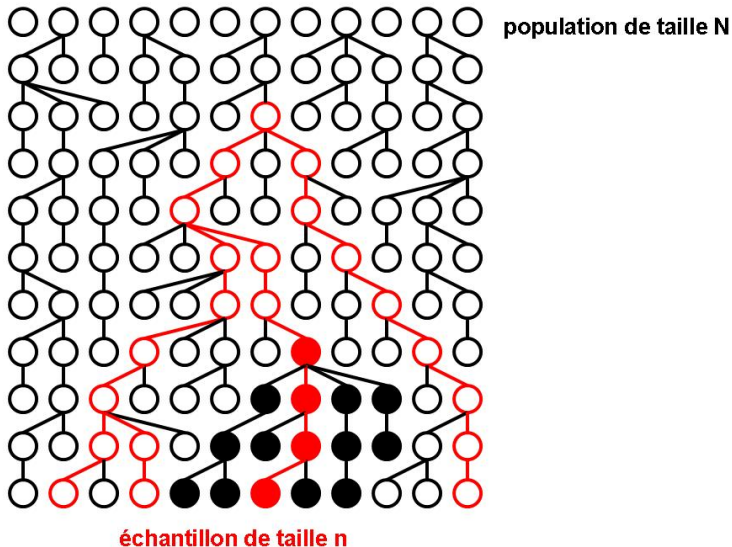
population de taille  $N$



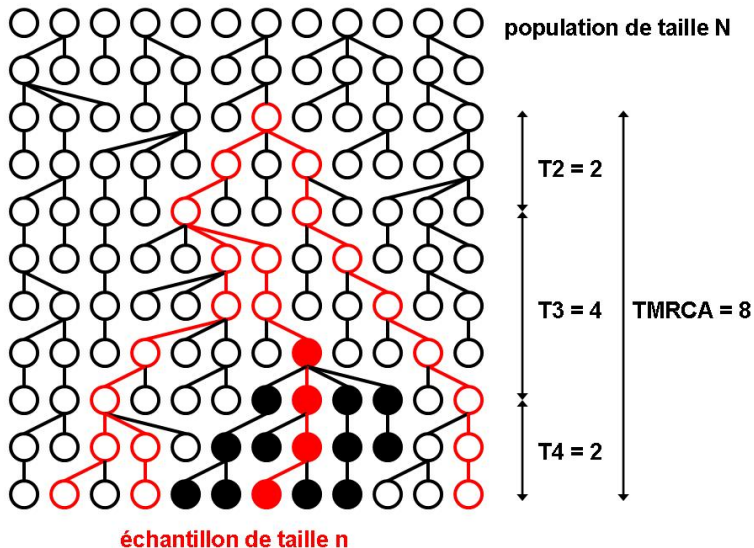
# Modèle de Wright-Fisher pour un locus sans recombinaison



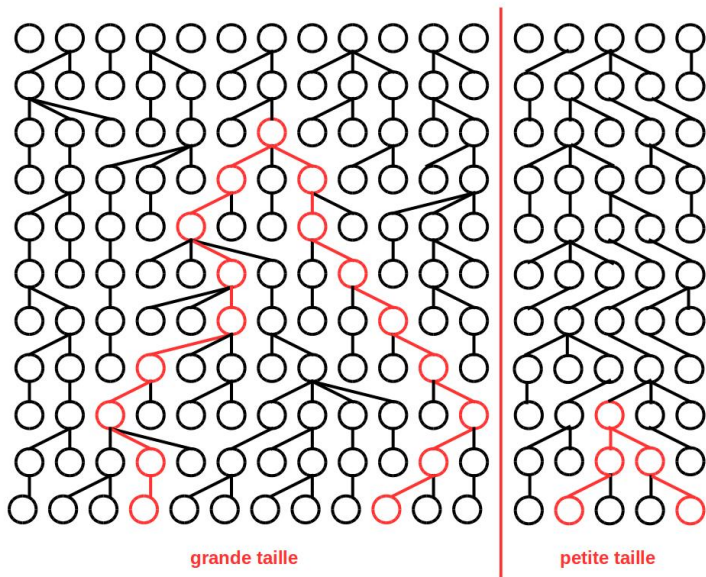
# Modèle de Wright-Fisher pour un locus sans recombinaison



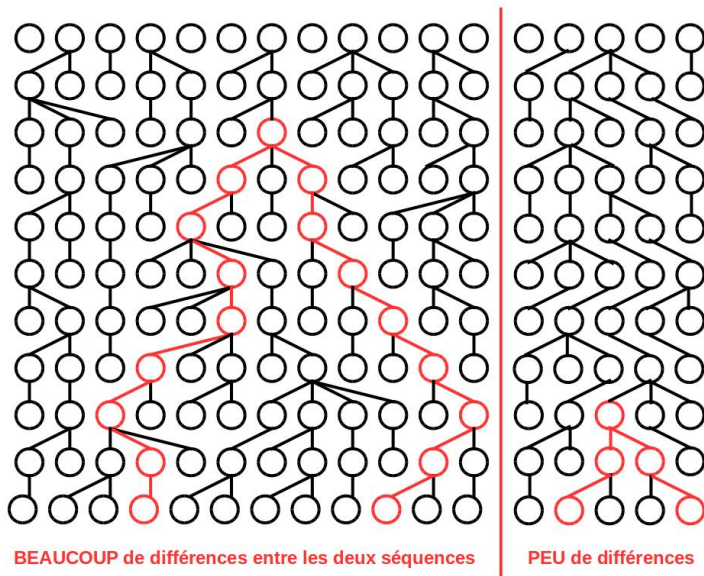
# Modèle de Wright-Fisher pour un locus sans recombinaison



# Généalogie et taille efficace



# Généalogie et taille efficace



- 1 Modèle de base : une population de taille constante, un locus sans recombinaison
- 2 Population de taille variable au cours du temps
- 3 Population structurée
- 4 Modèle avec recombinaison
- 5 Conclusions

- 1 **Modèle de base : une population de taille constante, un locus sans recombinaison**
- 2 Population de taille variable au cours du temps
- 3 Population structurée
- 4 Modèle avec recombinaison
- 5 Conclusions

- Proba qu'il n'y ait pas de coalescence à une génération donnée

$$q^N(n) = \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{i}{N}\right) = 1 - \frac{n(n-1)}{2N} + O\left(\frac{1}{N^2}\right)$$

- $T_n^N$  suit une loi géométrique

$$\mathbb{P}(T_n^N > t) = (q^N(n))^t$$

- Changement d'échelle  $\tau = \frac{t}{N}$

$$\mathbb{P}(T_n^N > N\tau) = (q^N(n))^{N\tau} \approx \left(1 - \frac{n(n-1)}{2N}\right)^{N\tau} \rightarrow e^{-\frac{n(n-1)}{2}\tau}$$

quand  $N \rightarrow +\infty$ .

$\rightarrow T_n^N$  tend vers  $T_n$ , de loi exponentielle de paramètre  $\frac{n(n-1)}{2}$ .



- La proba que trois individus ou plus coalescent à la même génération est en  $O(\frac{1}{N^2})$   
→ négligeable quand  $N \rightarrow +\infty$ .
- En pratique, une coalescence consiste toujours à regrouper exactement deux lignées.

$$\begin{aligned}T_{MRCA} &= \sum_{k=2}^n T_k \\ \mathbb{E}[T_{MRCA}] &= \sum_{k=2}^n \mathbb{E}[T_k] \\ &= \sum_{k=2}^n \frac{2}{k(k-1)} \\ &= 2 \sum_{k=2}^n \left( \frac{1}{k-1} - \frac{1}{k} \right) \\ &= 2 \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \approx 2\end{aligned}$$

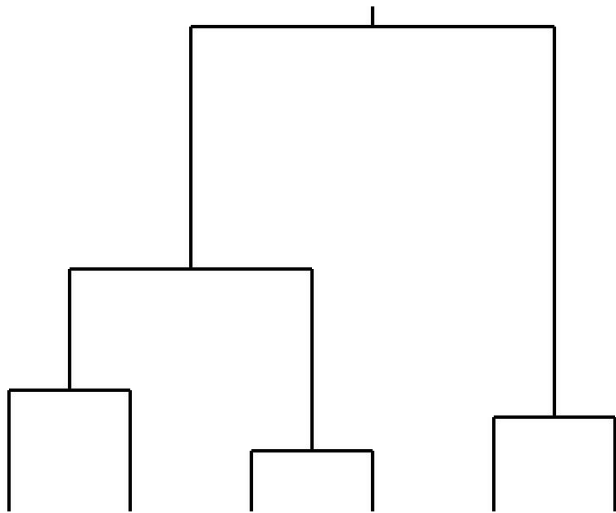
- Proba  $\mu$  de mutation par site et par méiose.
- $M(t)$  nombre de mutations pour une branche de longueur  $t = N\tau$  et un locus de taille  $L$ .

$$\mathbb{E}[M(t)] = \mu L N\tau = \frac{\theta}{2} L\tau$$

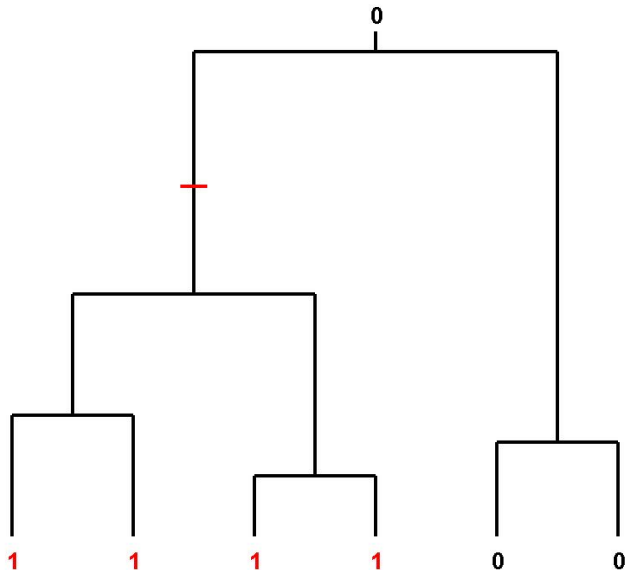
en posant  $\theta = 2N\mu$ .

- $M(\tau)$  loi de Poisson d'intensité  $\frac{\theta}{2} L\tau$ .
- On peut choisir ensuite le modèle qu'on veut pour décrire ce qui se passe quand une mutation se produit.

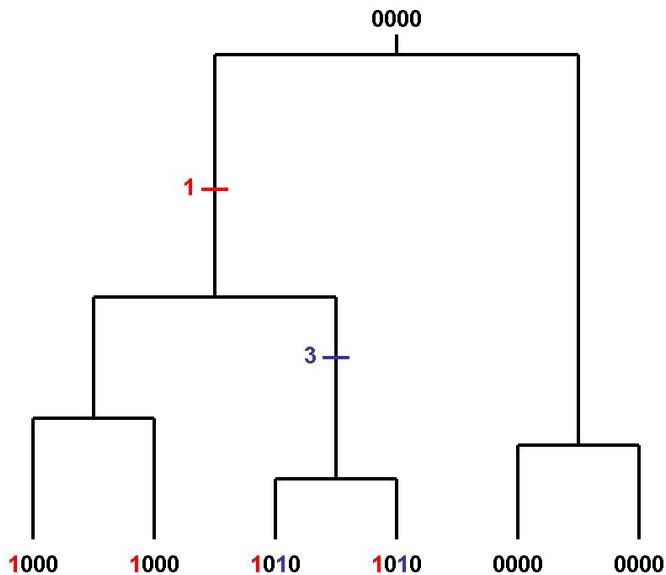
# Mutations



# Mutations



# Infinite site model



- 1 Pour  $k$  allant de  $n$  à 2 :
  - 1 Simuler une loi exponentielle  $T_k$  de paramètre  $\frac{k(k-1)}{2}$ .
  - 2 Choisir uniformément celui des  $\frac{k(k-1)}{2}$  couples d'haplotypes qui coalesce.
- 2 Placer les mutations indépendamment sur chaque branche selon un processus de Poisson d'intensité  $\frac{\theta}{2}L$ .

Beaucoup plus rapide que de simuler la population en forward!

- $N$  taille de la population,  $2N$  allèles.
- Remplacer  $N$  par  $2N$  dans tout ce qui précède.
- En particulier : unité de temps  $2N$  générations,  $\theta = 4N\mu$ .



- 1 Modèle de base : une population de taille constante, un locus sans recombinaison
- 2 Population de taille variable au cours du temps
- 3 Population structurée
- 4 Modèle avec recombinaison
- 5 Conclusions

- La taille de la population change selon une fonction déterministe du temps :
  - Croissance exponentielle :  $N(t) = N_0 * e^{-\alpha t}$ ,  $\alpha > 0$
  - Décroissance exponentielle :  $N(t) = N_0 * e^{\alpha t}$ ,  $\alpha > 0$
  - Décroissance linéaire :  $N(t) = N_0 + \alpha t$ ,  $\alpha > 0$
  - Goulot d'étranglement ("bottleneck") :  $N(t) = N_0$  si  $t < t^*$ ,  $N_1$  si  $t \geq t^*$
- La probabilité de coalescence dépend de la taille de population et donc varie au cours du temps.
- L'unité de temps est  $\tau = \frac{t}{N_0}$ .
- En un temps  $\tau$ , on a à peu près:

$$T_n(\tau) \sim \frac{N(\tau)}{N_0} \exp\left(\frac{n(n-1)}{2}\right)$$

# Simulation (approchée)

$$\tau = 0$$

**1** Pour  $k$  allant de  $n$  à 2 :

**1** Simuler une loi exponentielle  $T_k$  de paramètre  $\frac{k(k-1)}{2}$ .

**2**  $T_k = T_k * \frac{N(\tau)}{N_0}$ .

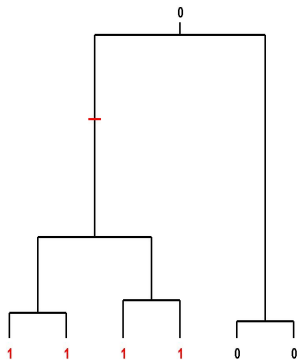
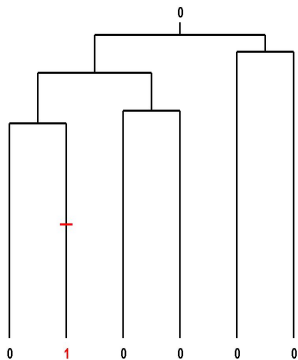
**3**  $\tau = \tau + T_k$ .

**4** Choisir uniformément celui des  $\frac{k(k-1)}{2}$  couples d'haplotypes qui coalesce.

**2** Placer les mutations indépendamment sur chaque branche selon un processus de Poisson d'intensité  $\frac{\theta}{2}L$ .

# Application

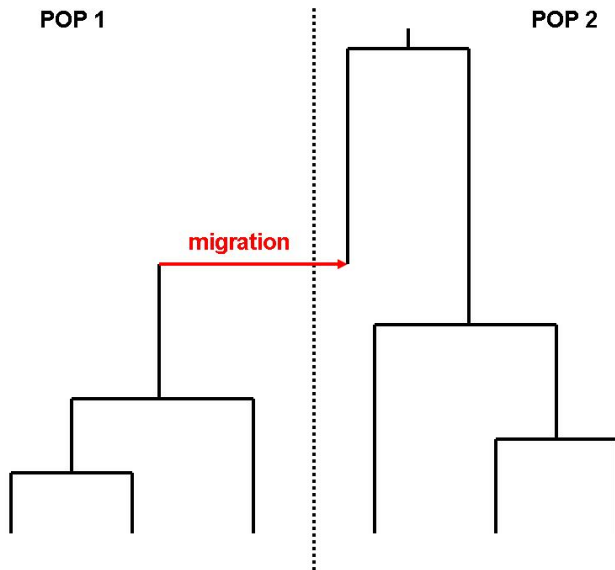
- Population croissante → temps de coalescence plus longs en bas de l'arbre → plus de fréquences alléliques extrêmes.
- Population décroissante → temps de coalescence plus longs en haut de l'arbre → plus de fréquences alléliques intermédiaires.



- 1 Modèle de base : une population de taille constante, un locus sans recombinaison
- 2 Population de taille variable au cours du temps
- 3 Population structurée**
- 4 Modèle avec recombinaison
- 5 Conclusions

- Pour chaque noeud de l'arbre, une étiquette indique sa population d'origine.
- Coalescences intra population. Par ex, pour deux pops 1 et 2, 2 évènements possibles : coalescence dans 1 et coalescence dans 2.
- Taille relative des pops importante car détermine la vitesse des évènements.
- Si migrations entre populations avec une proba par génération en  $O(\frac{1}{N})$ , évènements "migration de 1 vers 2" et "migration de 2 vers 1" possibles.

# Exemple

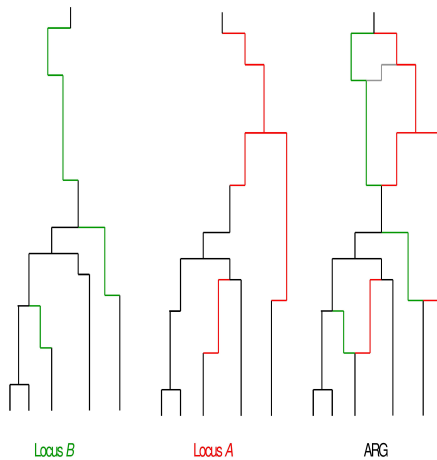


- 1 Modèle de base : une population de taille constante, un locus sans recombinaison
- 2 Population de taille variable au cours du temps
- 3 Population structurée
- 4 **Modèle avec recombinaison**
- 5 Conclusions



- Un haplotype créé par recombinaison n'a plus un seul mais deux parents.
- En remontant dans le temps, une branche peut donc se diviser en deux. Cela se produit avec une proba  $c$  par génération,  $c$  taux de recombinaison entre les locus.
- A l'échelle  $\tau = \frac{t}{N}$ , et en posant  $\rho = 2Nc$ , le temps au bout duquel une branche se divise en deux suit une loi exponentielle de paramètre  $\frac{\rho}{2}$ .
- La généalogie joite des deux locus est appelée "Ancestral Recombination Graph". On peut en déduire les arbres de coalescence marginaux pour chacun des locus (qui sont corrélés).

# Exemple



$k = n$ . Tant que  $k > 1$  :

- 1 Simuler  $U$ , une loi exponentielle de paramètre  $\frac{k(k-1)}{2}$ .
- 2 Simuler  $V$ , une loi exponentielle de paramètre  $\frac{k\rho}{2}$ .
- 3
  - Si  $U \leq V$ , choisir au hasard celui des  $\frac{k(k-1)}{2}$  couples d'haplotypes qui coalesce.
  - Si  $U > V$ , choisir au hasard celle des  $k$  lignées qui se sépare.

Remarque : le stade  $k = 1$  finit toujours par être atteint, mais cela peut être long.

- 1 Modèle de base : une population de taille constante, un locus sans recombinaison
- 2 Population de taille variable au cours du temps
- 3 Population structurée
- 4 Modèle avec recombinaison
- 5 Conclusions**

- Modèle théorique permettant de faire le lien entre des données génétiques observées et des modèles démographiques.
- Outil de simulation très performant.
- Logiciels de simulation : ms, msprime, scrm ...
- En pratique, tous les aspects du modèles (démographie, structure, recombinaison) sont mélangés.

- Simon Tavaré (2001), *Ancestral inference in molecular biology*. Ecole de Probabilités de Saint-Flour.
- Handbook of statistical genetics, Wiley. Chapitres 22.6, 25, 26, 27.3.