

### i TD III : Processus de branchement

- 18 Septembre 2025-25 Septembre 2025
- Master I ISIFAR
- **Probabilités**

Un processus de Galton-Watson (processus de branchement homogène) est un processus stochastique en temps discret utilisé pour modéliser l'évolution d'une population où chaque individu se reproduit indépendamment des autres, suivant une même loi de probabilité donnée (appelée *loi de reproduction*).

Il a été introduit au XIX<sup>e</sup> siècle par Francis Galton et Henry Watson pour étudier la probabilité d'extinction des noms de famille (nobles). On commence avec une *génération initiale* (génération 0) formée d'un individu. Chaque individu de la génération  $n$  engendre un nombre aléatoire de descendants distribué selon la loi de reproduction. Les descendants forment la génération suivante ( $n + 1$ ). Les nombres de descendants des individus de la génération  $n$  forment une famille indépendante. Le nombre d'individus dans la génération  $n$  est noté  $Z_n$ .

La question centrale (et angoissante) est : la population s'éteint-elle presque sûrement ( $Z_n \rightarrow 0$ ) ou bien survit-elle avec une probabilité non nulle ?

On note  $Q$  la *loi de reproduction* (loi sur  $(\mathbb{N}, 2^{\mathbb{N}})$ ). On note  $\mu$  son espérance. On note  $G_Q$  la fonction génératrice des probabilités de la loi  $Q$ .

On convient de  $\mathbb{N}^* = \mathbb{N} \setminus \{0\}$ .

#### Exercice 1 (Modélisation)

Proposer une formalisation, c'est à dire un univers  $\Omega$ , une tribu  $\mathcal{F}$  de parties de  $\Omega$ , et une loi de probabilité  $P$  sur  $(\Omega, \mathcal{F})$  sur lesquels on peut définir la collection de variables aléatoires  $Z_0, Z_1, \dots, Z_n, \dots$ . Préciser la loi conditionnelle de  $Z_{n+1}$  sachant  $\{Z_n = k\}, k \in \mathbb{N}$ .

### i Solution

Pour chaque génération, on se donne une suite infinie d'entiers, soit un élément de  $\mathbb{N}^{\mathbb{N}^*}$ . L'ensemble  $\mathbb{N}^{\mathbb{N}^*}$  n'est pas dénombrable.

Pour représenter la suite des générations, on se donne un élément de  $(\mathbb{N}^{\mathbb{N}^*})^{\mathbb{N}}$ . Cet ensemble est en bijection avec  $\mathbb{N}^{\mathbb{N}^* \times \mathbb{N}}$ . On convient de  $\Omega = \mathbb{N}^{\mathbb{N}^* \times \mathbb{N}}$ . Pour  $\omega \in \Omega$ ,  $X_j^n(\omega)$  est le nombre d'enfants de l'individu  $j \in \mathbb{N}^*$  dans la génération  $n \in \mathbb{N}$ .

Comme  $\Omega$  n'est pas dénombrable, on ne choisit pas l'ensemble de ses parties comme tribu. Pour la génération  $n \in \mathbb{N}$ , pour  $k \in \mathbb{N}^*$ ,  $\mathcal{G}_k^n$  est la tribu (de parties de  $\mathbb{N}^{\mathbb{N}^*}$ ) engendrée par  $X_1^n, X_2^n, \dots, X_k^n$ , et  $\mathcal{G}^n$  est la tribu engendrée par  $(\mathcal{G}_k^n)_{k \in \mathbb{N}^*}$ . La tribu  $\mathcal{G}^n = \sigma((\mathcal{G}_k^n)_{k \in \mathbb{N}^*})$  est la tribu engendrée par les événements cylindriques décrivant la génération  $n$ .

Pour chaque  $n$ ,  $\mathcal{F}_n = \sigma(\cup_{m \leq n} \mathcal{G}^m)$ , la tribu engendrée par les  $(X_j^m)_{m \leq n, j \in \mathbb{N}^*}$ .

Enfin  $\mathcal{F} = \sigma(\cup_n \mathcal{F}_n)$ .

Pour chaque  $n$ , on munit la  $n^{\text{ième}}$  génération de la loi produit infinie qui étend les lois produits finies définies sur  $\mathcal{G}_k^n$  :

$$P \left\{ \bigwedge_{j \leq k} X_j^n = x_j^n \right\} = \prod_{j \leq k} Q \{X_j^n = x_j^n\}$$

pour  $(x_j^n)_{1 \leq j \leq k} \in \mathbb{N}^k$

On munit  $(\Omega, \mathcal{F})$  de la loi produit infinie qui étend les lois produits finies sur les  $n$  premières générations.

La taille des générations  $(Z_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est définie récurrence. On a  $Z_0 = 1$  et

$$Z_{n+1} = \sum_{j=1}^{Z_n} X_j^n$$

Pour tout  $n$ ,  $Z_n$  est  $\mathcal{F}_{n-1}$ -mesurable (vérification par récurrence sur  $n$ )

Pour tout  $n$ ,  $\mathcal{F}_{n-1}$  est indépendante de  $\mathcal{G}^n$

### Exercice 2

Calculer l'espérance conditionnelle de  $Z_{n+1}$  sachant  $\sigma(Z_n)$

#### **i** Solution

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[Z_{n+1} \mid \mathcal{F}_{n-1}] &= \mathbb{E}\left[\sum_{j=1}^{Z_n} X_j^n \mid \mathcal{F}_{n-1}\right] \\ &= \mathbb{E}\left[\sum_{j=1}^{\infty} \mathbb{1}_{j \leq Z_n} X_j^n \mid \mathcal{F}_{n-1}\right] \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} \mathbb{1}_{j \leq Z_n} \mathbb{E}[X_j^n \mid \mathcal{F}_{n-1}] \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} \mathbb{1}_{j \leq Z_n} \mathbb{E}[X_j^n] \\ &= \sum_{j=1}^{Z_n} \mu \\ &= \mu \times Z_n\end{aligned}$$

On peut même conclure :

$$\mathbb{E}[Z_{n+1} \mid Z_n] = \mu \times Z_n$$

### Exercice 3

Calculer  $\mathbb{E}Z_n$  en fonction de  $\mu$  et  $n$ .

#### **i** Solution

$$\mathbb{E}Z_{n+1} = \mathbb{E}[\mathbb{E}[Z_{n+1} \mid Z_n]] = \mu \times \mathbb{E}Z_n$$

D'où :

$$\mathbb{E}Z_n = \mu^n$$

**! Convention**

Selon la valeur de  $\mu$  (espérance de la loi de reproduction), on distingue trois cas :

- $\mu < 1$ , cas sous-critique
- $\mu = 1$ , cas critique
- $\mu > 1$ , cas sur-critique

Dans tous les cas, on note  $p_E$  la probabilité d'extinction (probabilité de l'événement  $\cup_{n \in \mathbb{N}} \{Z_n = 0\}$ ).

**Exercice 4**

Calculer  $p_E$ , la probabilité d'extinction dans le cas sous-critique.

**i Solution**

$$E = \cup_n \{Z_n = 0\} = \cup_n \cap_{m \geq n} \{Z_m = 0\}$$

$$\Omega \setminus E = \cap_n \{Z_n > 0\}$$

Pour chaque  $k$

$$P\{\cap_n \{Z_n > 0\}\} \leq P\{Z_k > 0\}$$

Comme la suite des événements  $\{Z_n > 0\}$  est décroissante,

$$P\{\cap_n \{Z_n > 0\}\} \leq \lim_n P\{Z_n > 0\}$$

. Comme

$$P\{Z_n > 0\} \leq \mathbb{E}Z_n$$

on conclut dans le cas sous-critique  $\mu < 1$ , que

$$P\{\cap_n \{Z_n > 0\}\} = 0$$

Soit

$$P\{E\} = 1$$

(extinction presque sûre).

**Exercice 5**

Montrer que dans tous les cas,  $p_E$  est solution de l'équation  $G_Q(x) = x$ .

**i Solution**

$$E = \cup_{k=1}^{\infty} \{Z_1 = k\} \cap_{j=1}^k E_j$$

$$\begin{aligned} p_E &= \mathbb{E} [\mathbb{I}_E \mid Z_1] \\ &= \mathbb{E} [p_E^{Z_1}] \\ &= G_Q(p_E) \end{aligned}$$

car  $Z_1 \sim Q$ .

La probabilité d'extinction satisfait l'équation :

$$p_E = G_Q(p_E)$$

La Figure 1 illustre le problème posé par l'équation  $p_E = G_Q(p_E)$  lorsque la loi de reproduction  $Q$  est la loi de Poisson de paramètre  $\mu = 1.5$ . Les deux intersections entre la courbe en trait plein et la droite pointillée représentent les deux solutions de l'équation  $p_E = G_Q(p_E)$ .

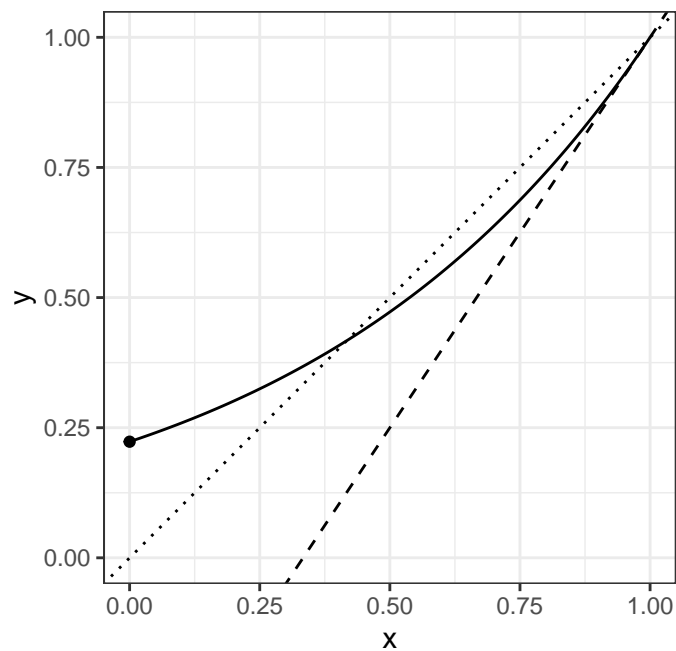


FIG. 1 : Fonction génératrice de la loi de Poisson de paramètre  $\mu = 1.5$  :  $s \mapsto \exp(s(\mu - 1))$ . La droite pointillée représente l'équation  $y = x$ . La droite en tiret l'équation  $y = 1 + \mu(x - 1)$

### Exercice 6

Étudier les solutions de l'équation  $x = G_Q(x)$ .

#### **i** Solution

Comme série entière de rayon de convergence  $\geq 1$ , dérivable en 1,  $G_Q$  possède les propriétés suivantes :

- $G_Q$  est croissante et convexe sur  $[0, 1]$ , indéfiniment dérivable sur  $]0, 1[$
- La dérivée de  $G_Q$  en  $x = 1$  est égale à l'espérance de la loi de reproduction  $Q$ , soit  $\mu$ .

La fonction  $x \mapsto G_Q(x) - x$  est convexe, de dérivée  $G'_Q - 1$  sur  $[0, 1]$ .

Si  $\mu < 1$ , la dérivée croît jusqu'à 0 atteint en  $x = 1$ .  $G_Q(x) - x$  décroît donc de  $Q(0)$  à 0 entre 0 et 1. L'équation  $x = G_Q(x)$  ne possède qu'une seule racine (triviale),  $x = 1$ . On retrouve le fait que  $p_E$  soit égal à 1 dans le cas sous-critique.

Si  $\mu > 1$ ,  $G'_Q(0) - 1 = Q(\{1\}) - 1 < 0$  et  $G'_Q(1) - 1 = \mu - 1 > 0$ ,  $G'_Q - 1$  s'annule en un  $\theta \in ]0, 1[$ , est négative sur  $[0, \theta]$ , positive sur  $[\theta, 1]$ . La fonction  $G_Q(x) - x$  décroît de 0 à  $\theta$ , croît de  $\theta$  à 1. Elle est positive en 0 et nulle en 1, elle s'annule donc une seule fois entre 0 et  $\theta$ . Dans le cas sur-critique, l'équation  $x = G_Q(x)$  admet une racine non-triviale entre 0 et 1. Pour déterminer  $p_E$  dans le cas sur-critique, il faut déterminer la racine de l'équation  $x = G_Q(x)$  qui est égale à  $p_E$ .

### Exercice 7

Déterminer  $p_E$  dans le cas sur-critique.

**i Solution**

Pour déterminer  $p_E$  dans le cas sur-critique, nous allons étudier la suite  $(P\{Z_n = 0\})_n$ . C'est une suite croissante, majorée par 1. Elle possède une limite dans  $[0, 1]$ , et  $p_E = \lim_n \uparrow P\{Z_n = 0\}$ .

On note  $P\{Z_1 = 0\} = Q\{0\}$  ou encore  $P\{Z_1 = 0\} = G_Q(0)$ .

La relation entre  $P\{Z_n = 0\}$  et  $G_Q$  est (relativement) simple et pas inattendue.

Si on note  $G_{Z_n}$  la fonction génératrice de la loi de  $Z_n$ , on a d'abord  $G_{Z_1} = G_Q$ .

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[s^{Z_{n+1}} \mid \sigma(Z_n)] &= \mathbb{E}\left[s^{\sum_{i=1}^{Z_n} X_i^n} \mid \sigma(Z_n)\right] \\ &= \mathbb{E}\left[\prod_{i=1}^{Z_n} s^{X_i^n} \mid \sigma(Z_n)\right] \\ &= \prod_{i=1}^{Z_n} \mathbb{E}[s^{X_i^n} \mid \sigma(Z_n)] \\ &= \prod_{i=1}^{Z_n} G_Q(s) \\ &= (G_Q(s))^{Z_n}.\end{aligned}$$

On en déduit :

$$G_{Z_{n+1}}(s) = \mathbb{E}[(G_Q(s))^{Z_n}] = G_{Z_n}(G_Q(s))$$

D'où (par récurrence sur  $n$ ) :

$$G_{Z_n} = \underbrace{G_Q \circ \dots \circ G_Q}_{n \text{ fois}}$$

Comme

$$P\{Z_n = 0\} = G_{Z_n}(0)$$

on a

$$P\{Z_n = 0\} = \underbrace{G_Q \circ \dots \circ G_Q}_{n \text{ fois}}(0)$$

la suite  $P\{Z_n = 0\}$ , vérifie la récurrence  $u_{n+1} = G_Q(u_n)$  avec  $u_1 = Q\{0\}$ .

Notons  $\tau$  la solution non-triviale de  $x = G_Q(x)$ .

Si  $u \in [0, \tau[$ , alors

$$u < G_Q(u) < \tau$$

Cette observation permet de déduire que la suite  $(u_n)_n$  définie par  $u_{n+1} = G_Q(u_n)$  et  $u_1 = Q\{0\}$  est croissante et majorée par  $\tau$ . Elle admet une limite qui est un point fixe de  $G_Q$ , c'est donc  $\tau$ .

On peut donc conclure que dans le cas sur-critique, la probabilité d'extinction est la solution non-triviale de l'équation  $x = G_Q(x)$ .