

Modèle mathématique pour caractériser la dynamique de population de *Ceratitis capitata* dans un contexte de contrôle par la Technique de l'Insecte Stérile (TIS)

Kévan Rastello

Université de Rennes 1

M1 BEE MODE 2020/2021

Soutenance le 24/06/2021

Sous la direction de :

Ludovic Mailleret

Suzanne Touzeau

Louise van Oudenhoove

Frédéric Grognard



©Alvesgaspar

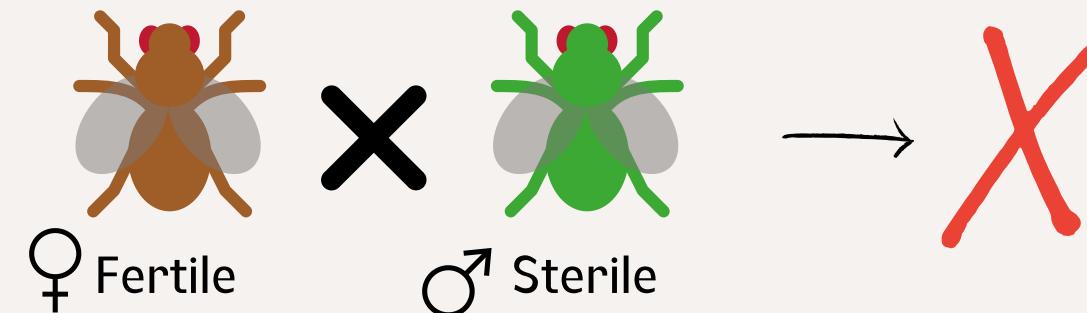


Objectif du stage

Construire un modèle de dynamique des populations de *Ceratitis capitata*

Perspective : Technique de l'Insecte Stérile (TIS)

TIS = Lâchers inondatifs de mâles stérilisés

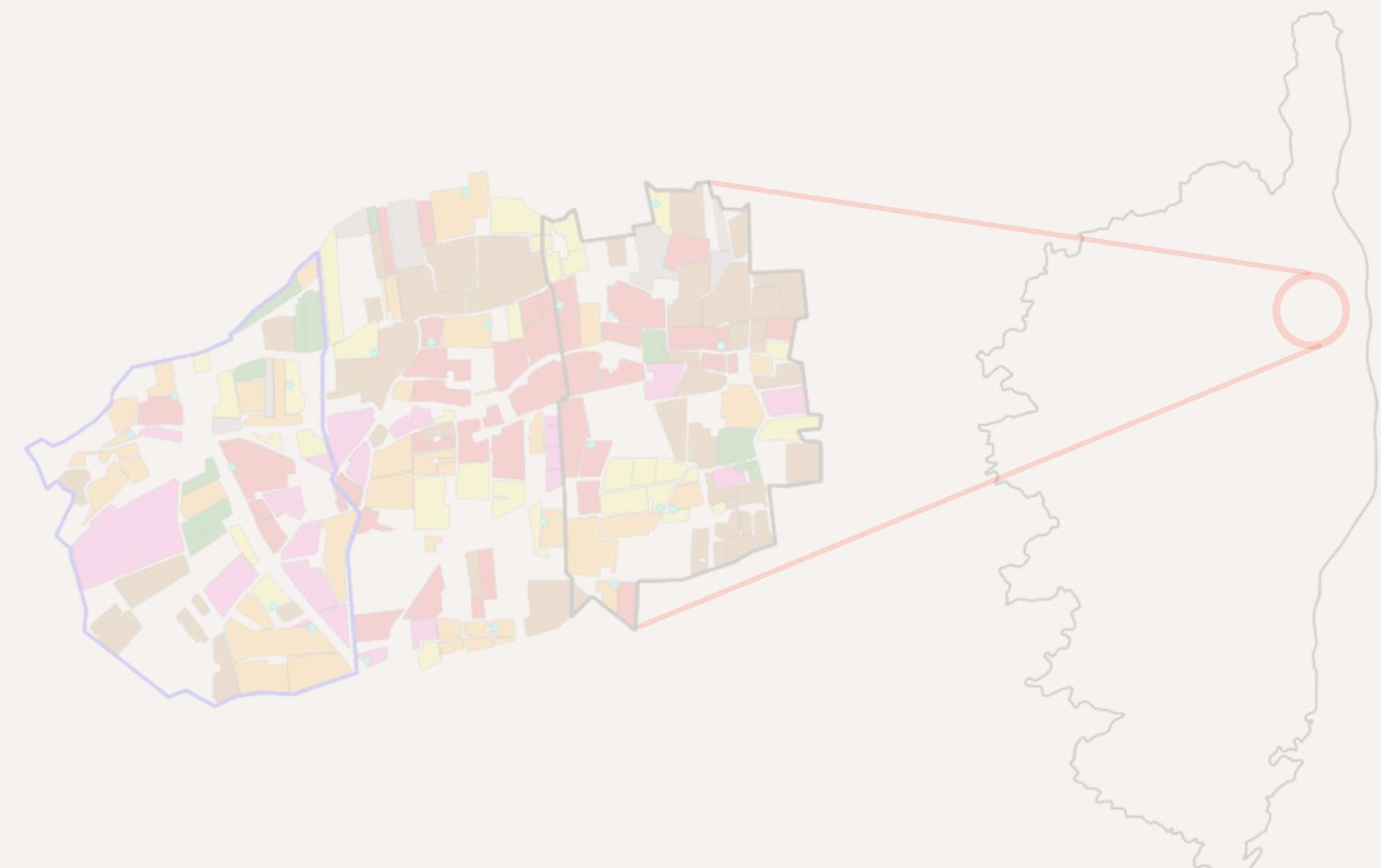


Accouplements entre mâles stériles et femelles sauvages entraînent une descendance non viable

CeraTIS Corse

PLAN
ÉCOPHYTO II
+

<< Gestion Territoriale de la Ceratite en Corse par la Technique de l'Insecte Stérile >>



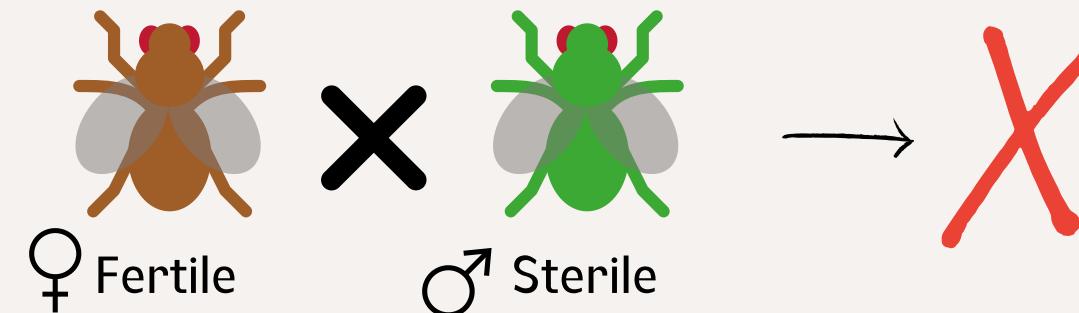
Zone d'étude du projet CeraTIS sur la plaine orientale corse

Objectif du stage

Construire un modèle de dynamique des populations de *Ceratitis capitata*

Perspective : Technique de l'Insecte Stérile (TIS)

TIS = Lâchers inondatifs de mâles stérilisés

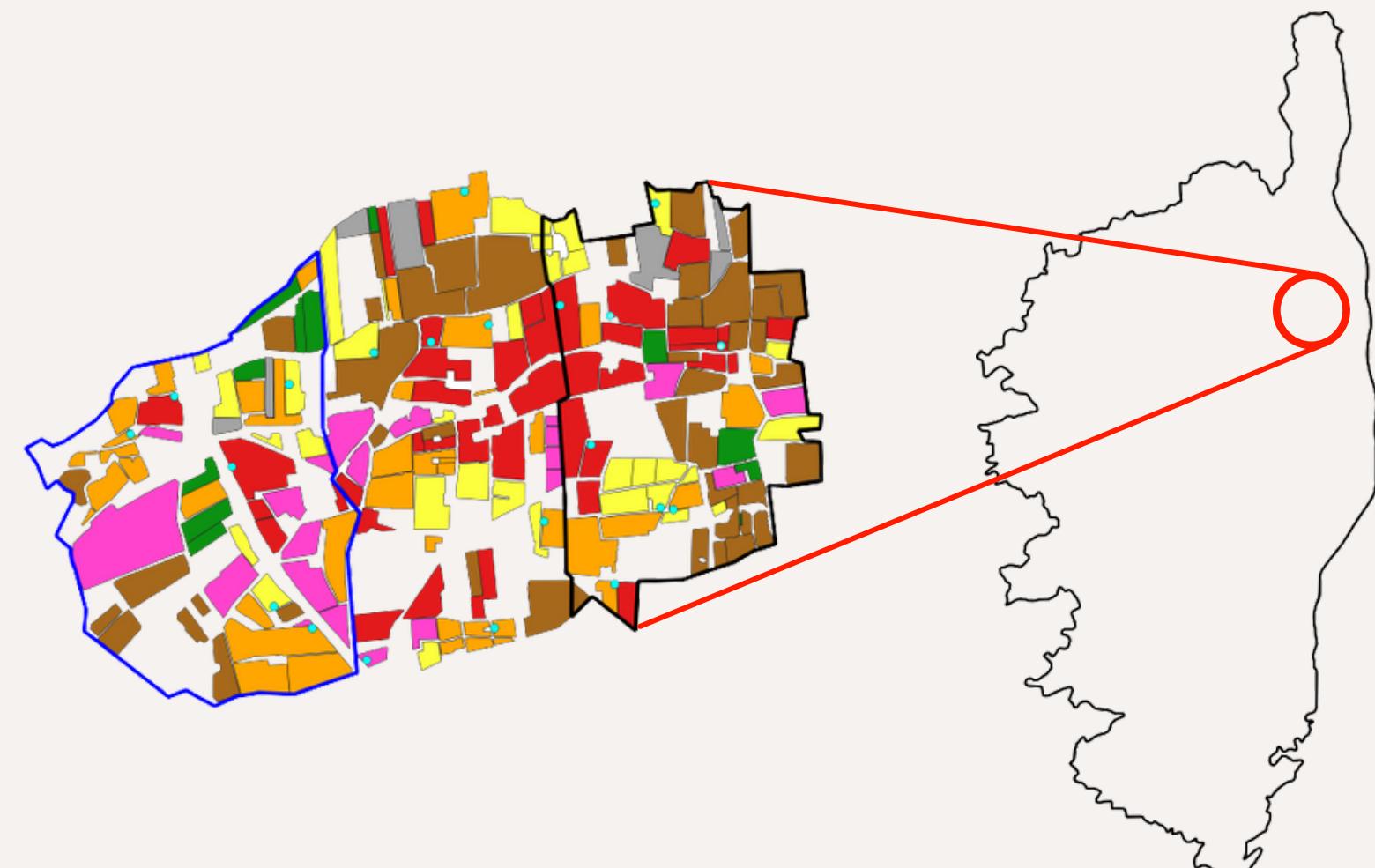


Accouplements entre mâles stériles et femelles sauvages entraînent une descendance non viable

CeraTIS Corse

PLAN
ÉCOPHYTO II
+

« Gestion Territoriale de la **Ceratite** en **Corse**
par la **Technique de l'Insecte Stérile** »



Zone d'étude du projet CeraTIS sur la plaine orientale corse

Biologie de *Ceratitis capitata*

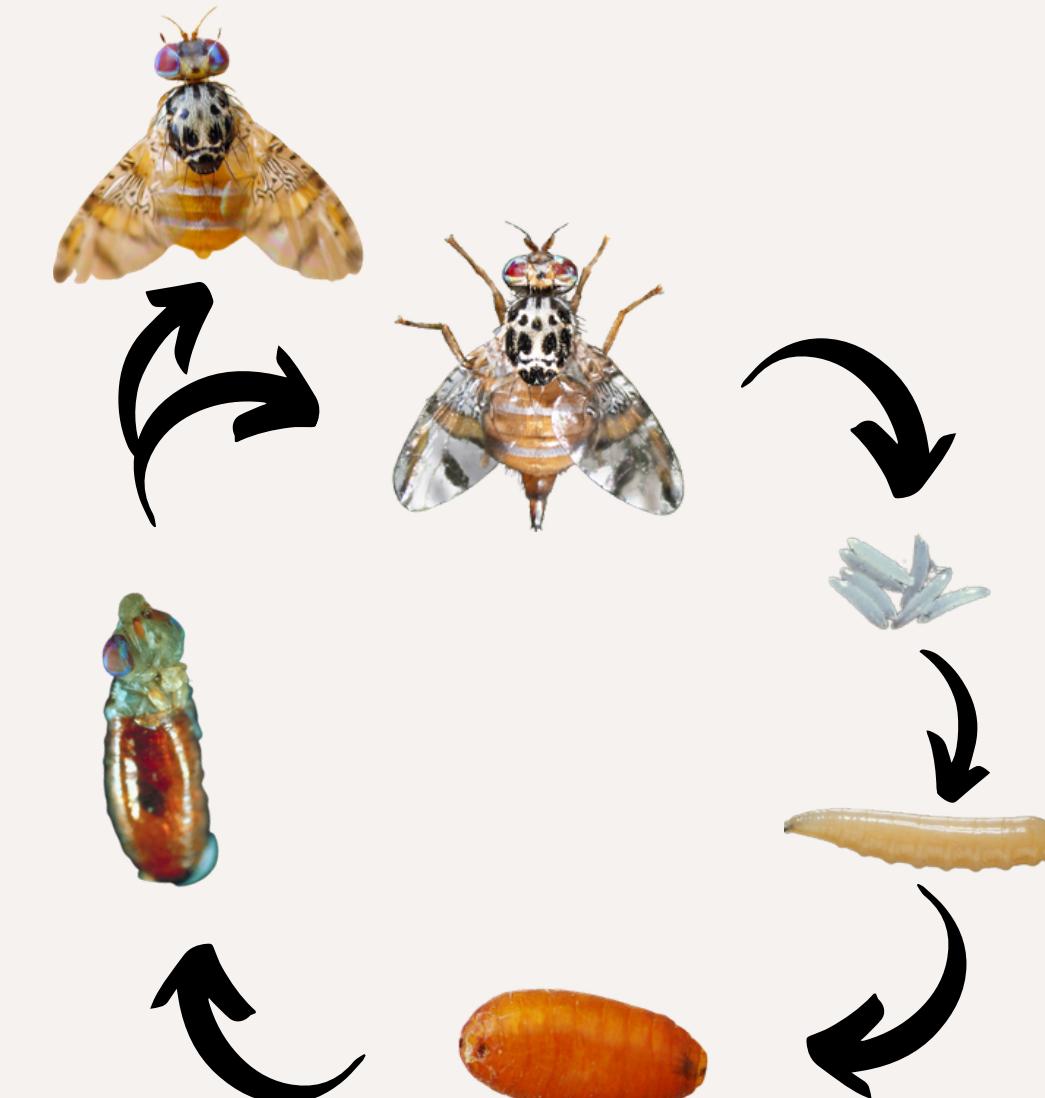
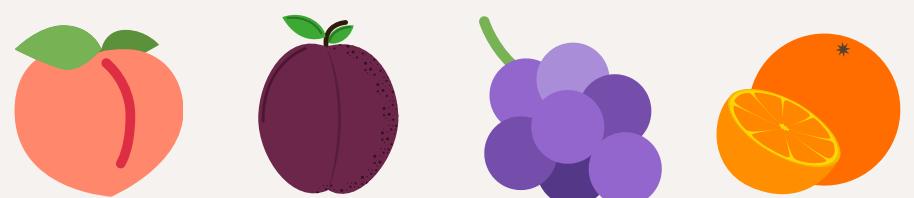
Ceratitis capitata (Wiedmann) (Diptera : Tephritidae)

Ravageur majeur des cultures

(Stonehouse *et al.*, 1998)

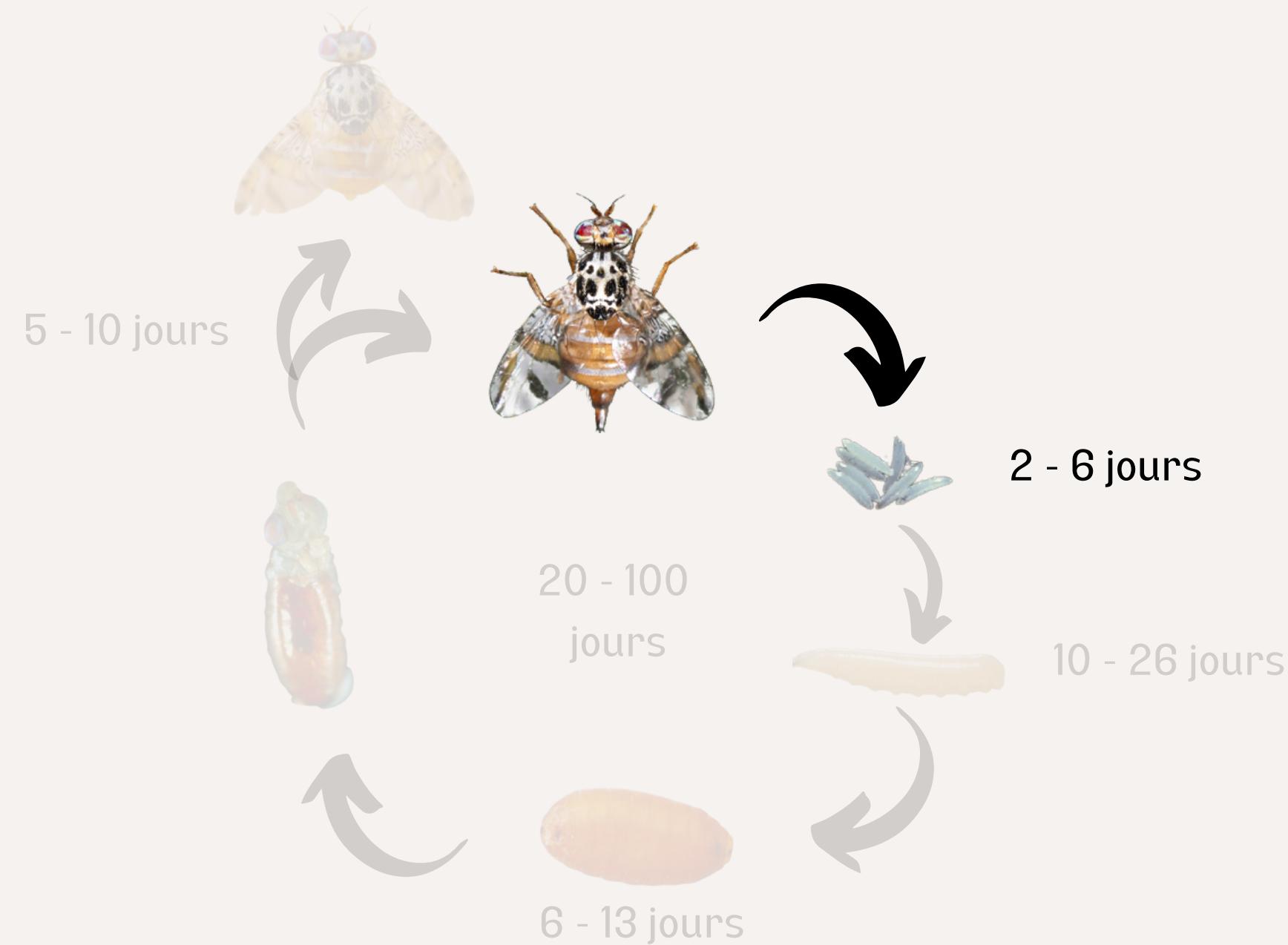
Hautement polyphage : 350 espèces végétales

(Liquido, 1990)



Cycle de vie de *Ceratitis capitata*, (selon Thomas *et al.*, 2019)

Cycle de vie : *Ceratitis capitata*

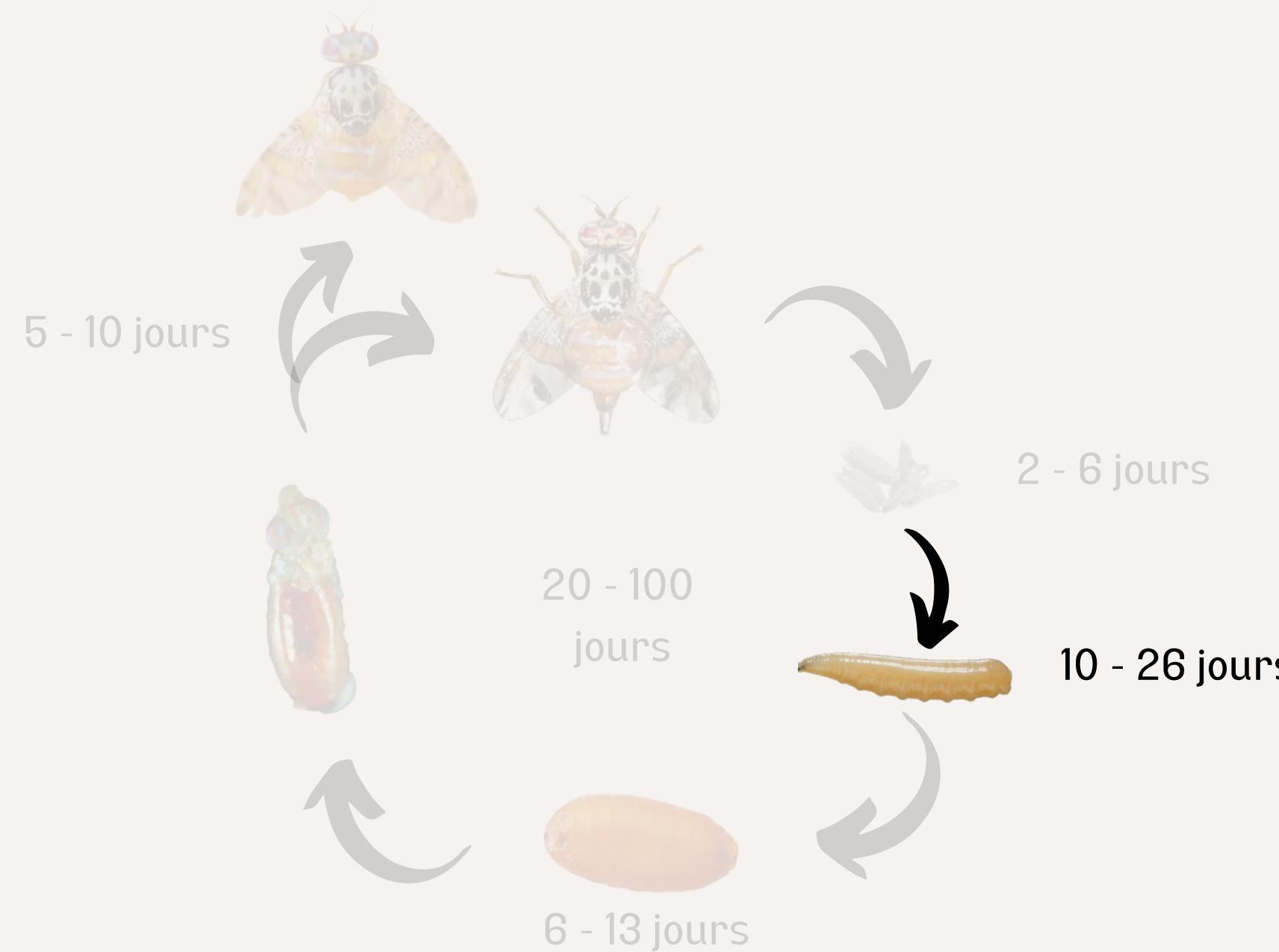


Rencontre de femelles sur un fruit

= Diminution du niveau d'oviposition

(McDonalds & McInnis, 1985)

Cycle de vie : *Ceratitis capitata*



Nourrissage des larves sur la pulpe
(Back & Pemberton, 1918)

A maturité s'enfoncent dans le sol
(Gjullin 1931)

Cycle de vie : *Ceratitis capitata*

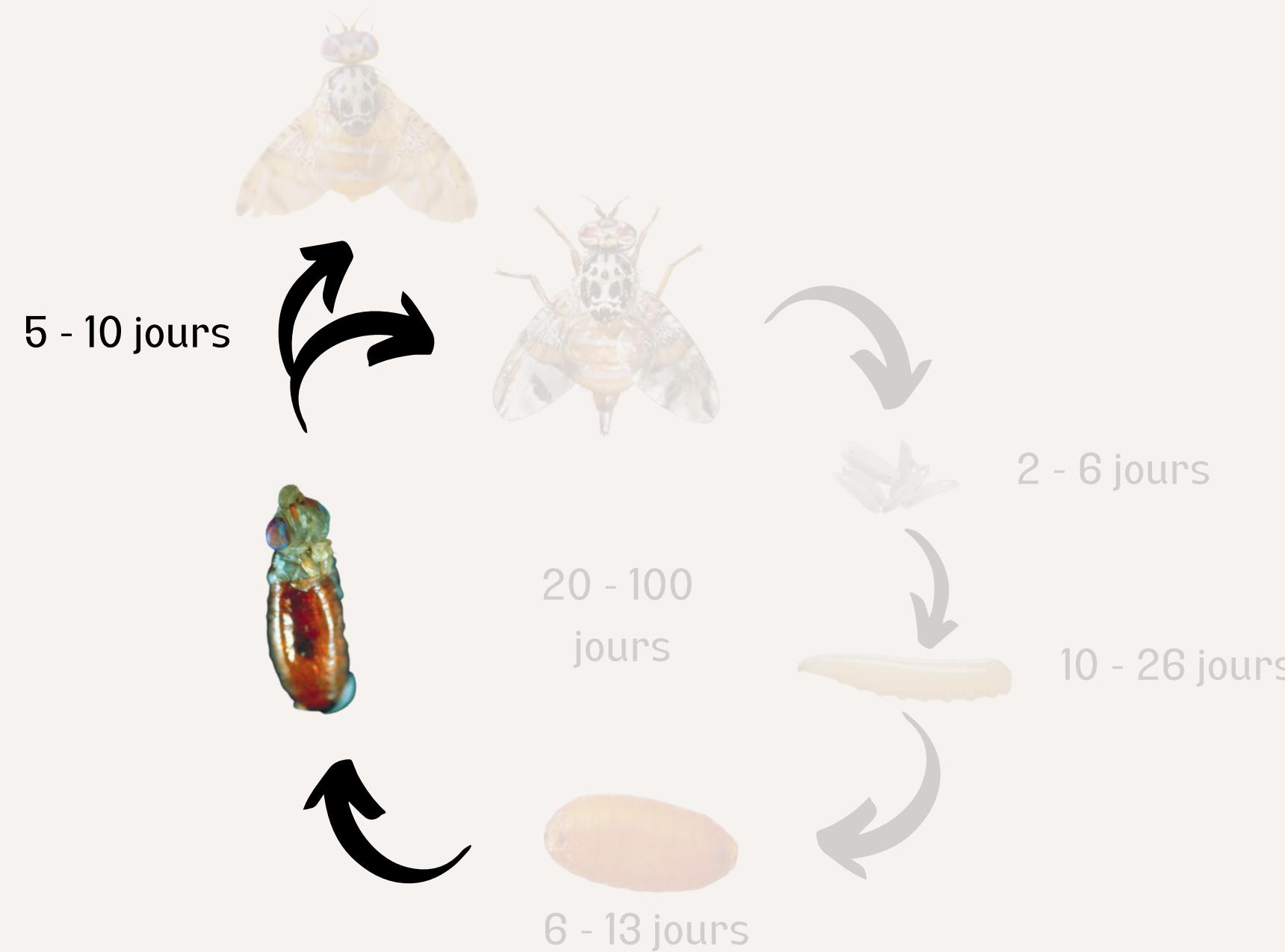


Pupation dans le sol

(Messenger, 1959)

Cycle de vie de *Ceratitis capitata*, (selon Thomas et al., 2019)

Cycle de vie : *Ceratitis capitata*

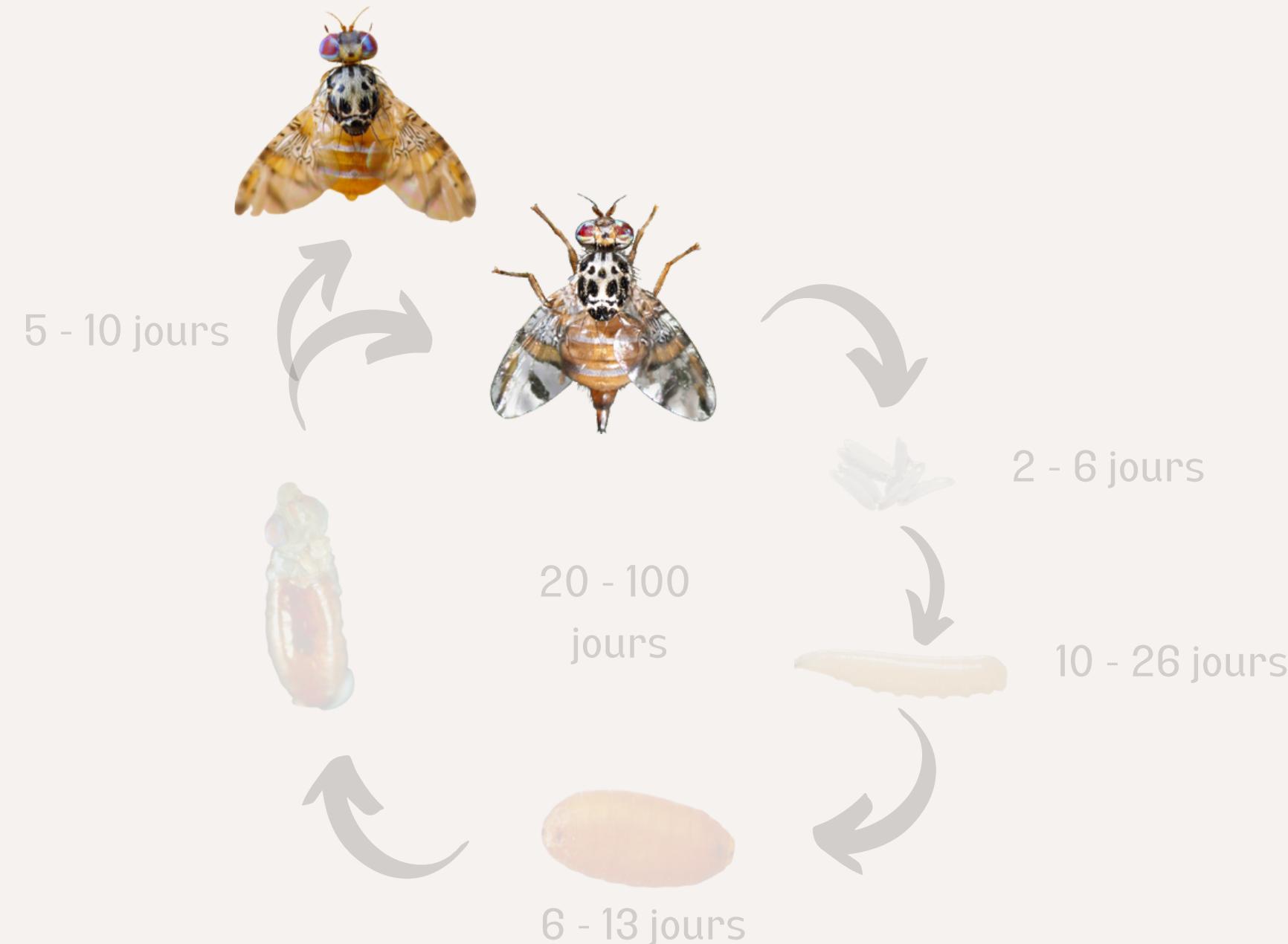


Maturation sexuelle : 5 - 10 jours

(Vargas et al., 2000)

Cycle de vie de *Ceratitis capitata*, (selon Thomas et al., 2019)

Cycle de vie : *Ceratitis capitata*



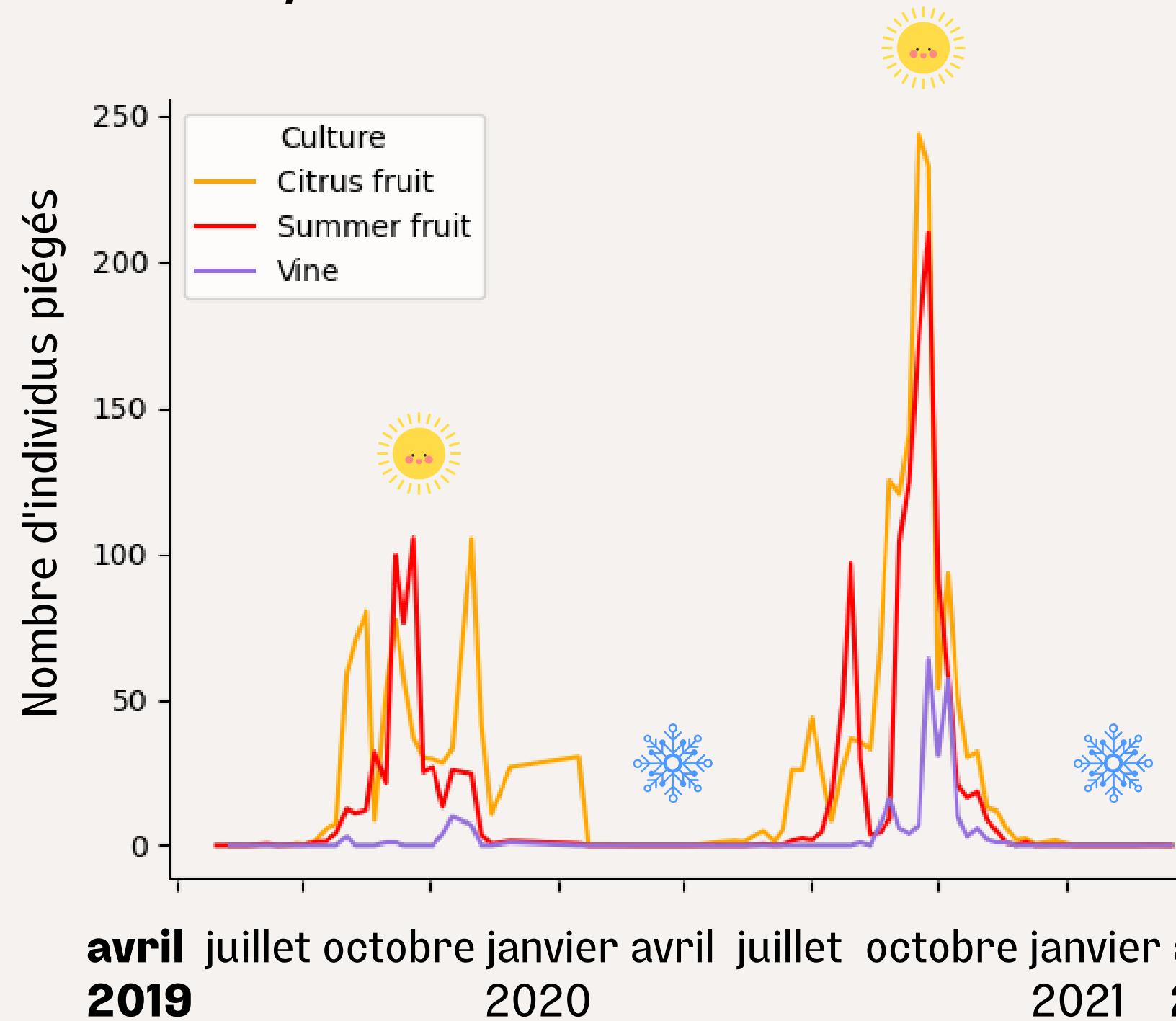
Formation de lek = agrégat de mâles

(Prokopy & Hendrichs, 1979)

Sélection des mâles par les femelles

(Whittier & Kaneshiro, 1995)

Ceratitis capitata : Saisonnalité

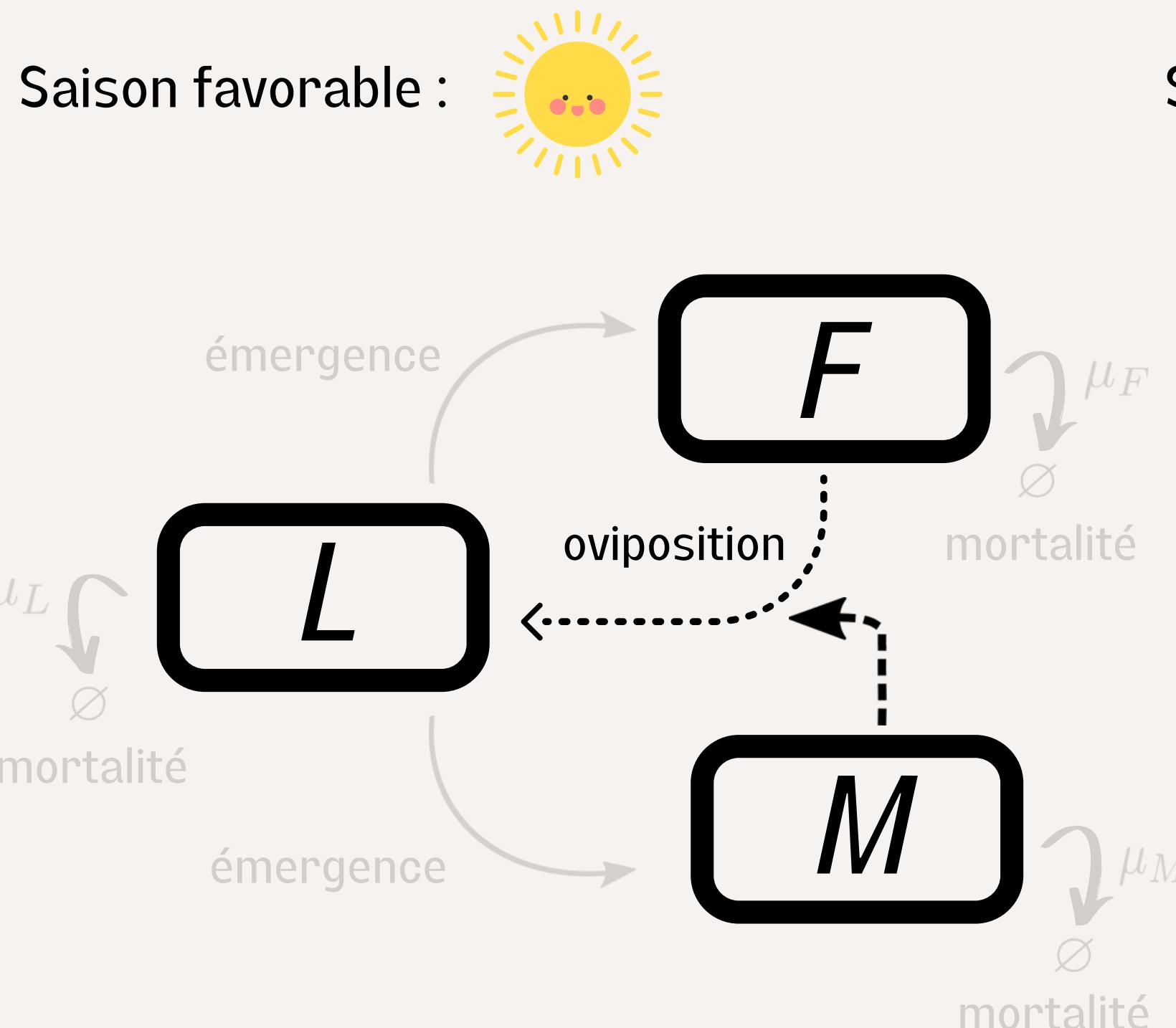


Saisonnalité marquée chez *Ceratitis capitata*
(CeraTIS)

Pas de mécanisme de diapause
(Christenson & Foote, 1960)

Mort des adultes et survie dans le sol sous
forme de larves et de pupes
(Michelakis, 1992)

Modèle : Saison favorable



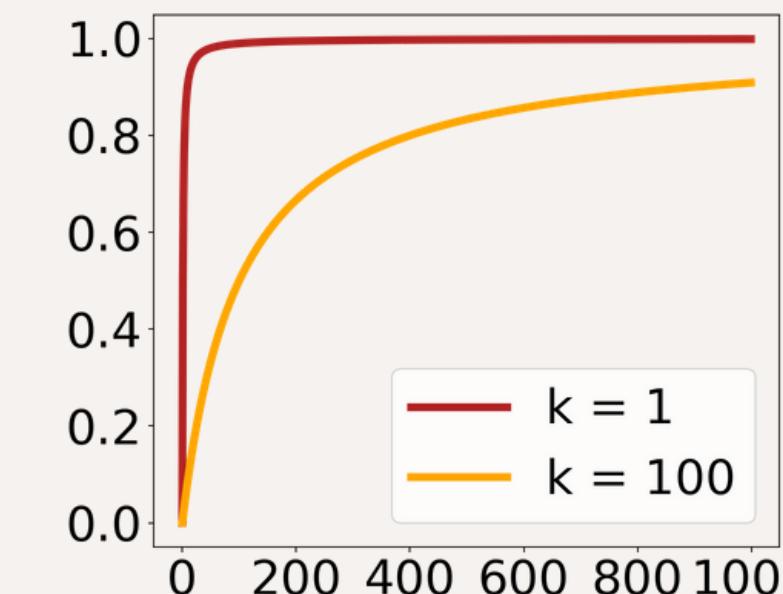
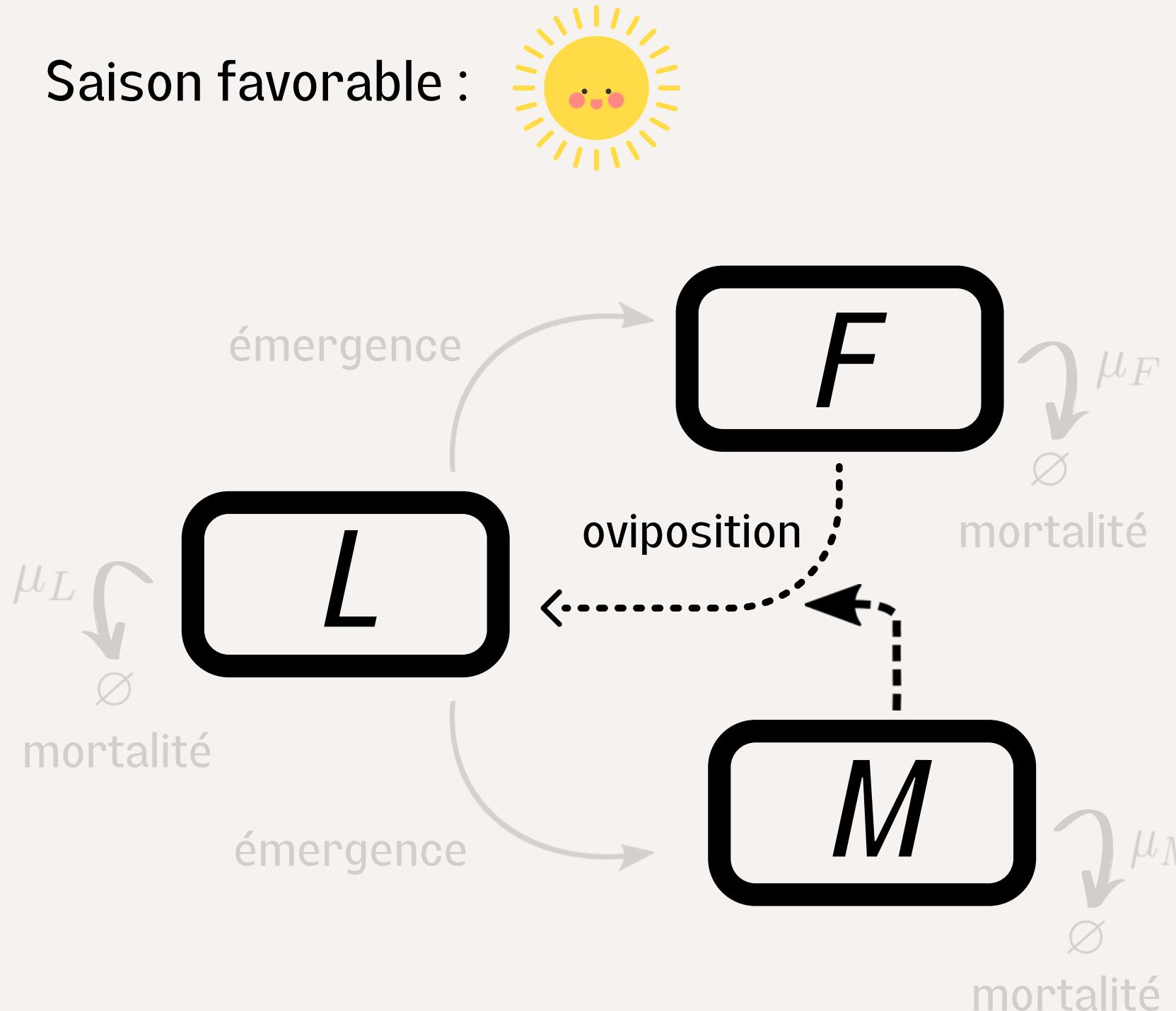
Système EDO : 3 stades : larve, femelle et mâle

$$\boxed{L} = \text{oeuf} + \text{larve} + \text{pupe}$$

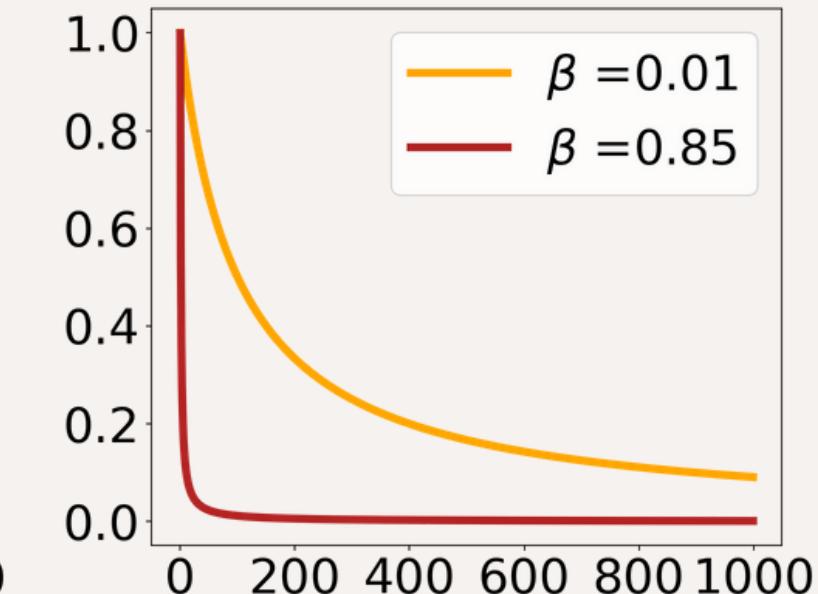
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{L} = \gamma \frac{M}{k+M} \frac{1}{1+\beta F} F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1-p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{array} \right.$$

Modèle : Saison favorable

Saison favorable :

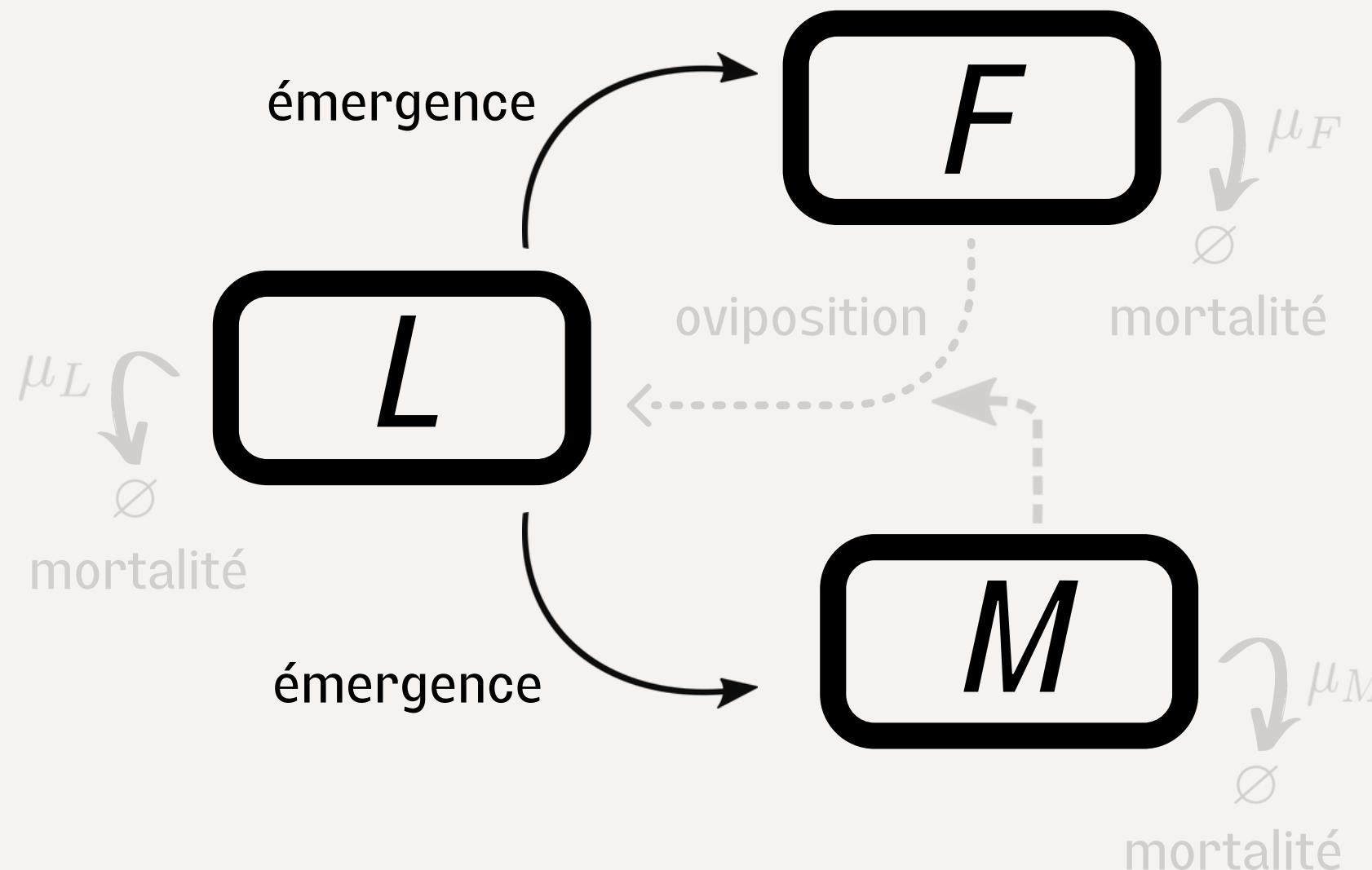


$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{L} = \gamma \frac{M}{k+M} \frac{1}{1+\beta F} F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1-p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{array} \right.$$



Modèle : Saison favorable

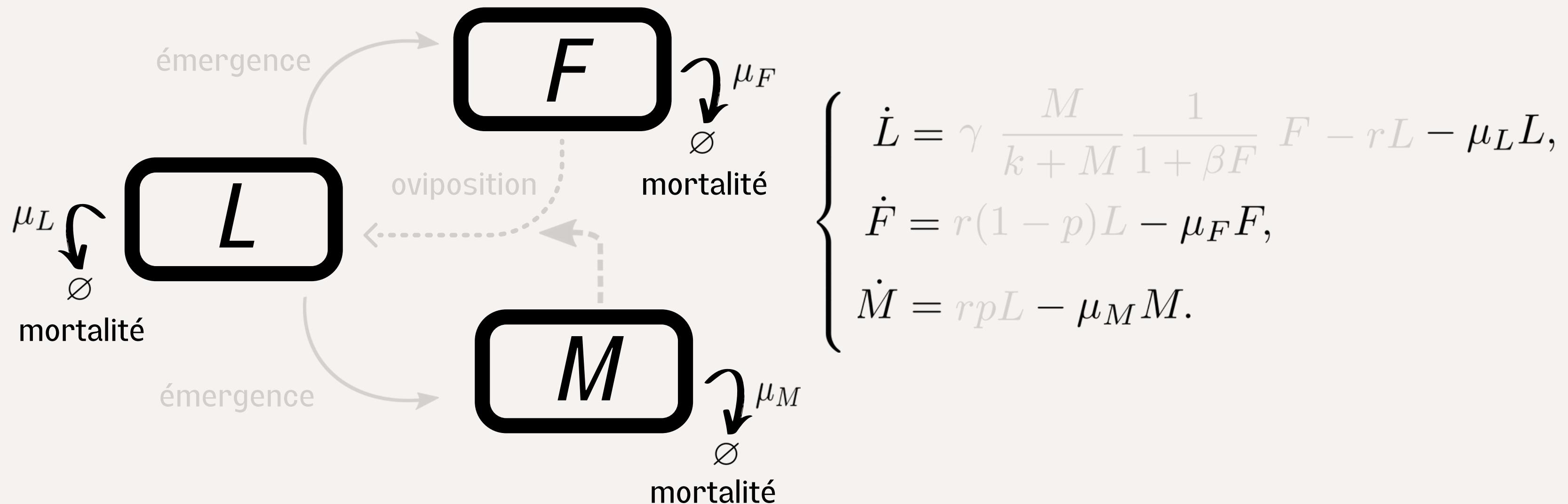
Saison favorable :



$$\begin{cases} \dot{L} = \gamma \frac{M}{k+M} \frac{1}{1+\beta F} F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1-p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{cases}$$

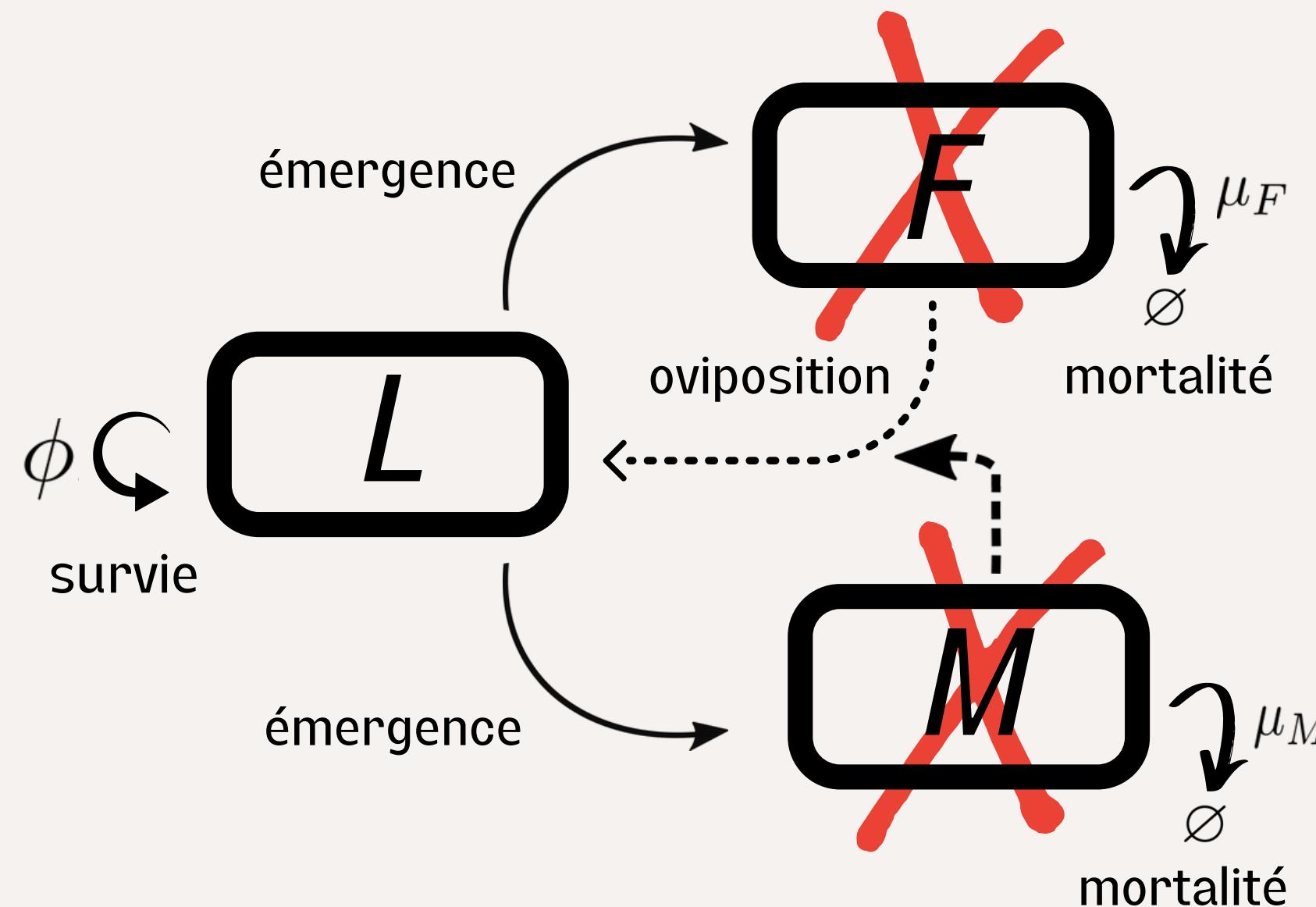
Modèle : Saison favorable

Saison favorable :



Modèle : Inter-saison

Inter-saison :



$$\left\{ \begin{array}{l} L((n+1)T) = \phi L(nT + \tau), \\ F((n+1)T) = 0, \\ M((n+1)T) = 0. \end{array} \right.$$

Calibration du modèle

15 études compilées : paramètres issus de :

- Données brutes extraites d'expérimentations
- Recalcul sur des données expérimentales / terrain
- β = un paramètre d'échelle

Parameter	Description	Value & [Range]	Unit
r	larval emergence rate ¹	0.047 [0.033 - 0.061]	day ⁻¹
p	male proportion in offspring ²	0.50 [0.45 - 0.55]	-
k	mating half-saturation constant	[1 - 100]	♂ density
γ	oviposition rate ³	25.52 [6.8 - 41.5]	eggs / (♀.day)
β	oviposition competition	0.85	(♀ density) ⁻¹
μ_L	larval mortality rate ⁴	0.061 [0.002 - 0.120]	day ⁻¹
μ_M	male mortality rate ⁵	0.036 [0.014 - 0.057]	day ⁻¹
μ_F	female mortality rate ⁵	0.050 [0.018 - 0.083]	day ⁻¹
ϕ	larval survival	0.01	-

Paramètres de référence utilisés dans les simulations

Calibration du modèle

15 études compilées : paramètres issus de :

- Données brutes extraites d'expérimentations
- Recalcul sur des données expérimentales
- β = un paramètre d'échelle

Parameter	Description	Value & [Range]	Unit
r	larval emergence rate ¹	0.047 [0.033 - 0.061]	day ⁻¹
p	male proportion in offspring ²	0.50 [0.45 - 0.55]	-
k	mating half-saturation constant	[1 - 100]	♂ density
γ	oviposition rate ³	25.52 [6.8 - 41.5]	eggs / (♀.day)
β	oviposition competition	0.85	(♀ density) ⁻¹
μ_L	larval mortality rate ⁴	0.061 [0.002 - 0.120]	day ⁻¹
μ_M	male mortality rate ⁵	0.036 [0.014 - 0.057]	day ⁻¹
μ_F	female mortality rate ⁵	0.050 [0.018 - 0.083]	day ⁻¹
ϕ	larval survival	0.01	-

Paramètres de référence utilisés dans les simulations

Calibration du modèle

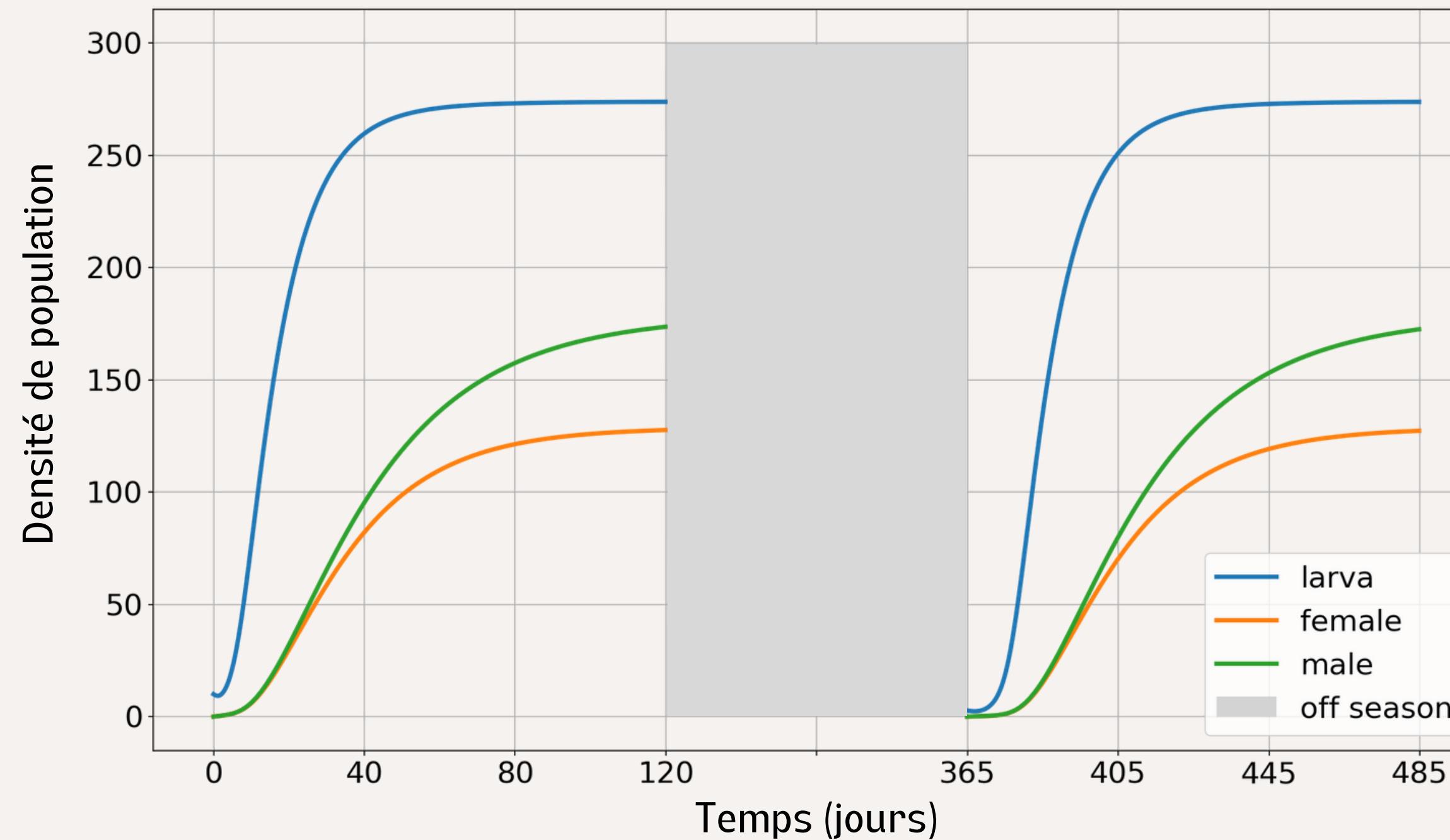
15 études compilées : paramètres issus de :

- Données brutes extraites d'expérimentations
- Recalcul sur des données expérimentales / terrain
- β = un paramètre d'échelle

Parameter	Description	Value & [Range]	Unit
r	larval emergence rate ¹	0.047 [0.033 - 0.061]	day ⁻¹
p	male proportion in offspring ²	0.50 [0.45 - 0.55]	-
k	mating half-saturation constant	[1 - 100]	♂ density
γ	oviposition rate ³	25.52 [6.8 - 41.5]	eggs / (♀.day)
β	oviposition competition	0.85	(♀ density) ⁻¹
μ_L	larval mortality rate ⁴	0.061 [0.002 - 0.120]	day ⁻¹
μ_M	male mortality rate ⁵	0.036 [0.014 - 0.057]	day ⁻¹
μ_F	female mortality rate ⁵	0.050 [0.018 - 0.083]	day ⁻¹
ϕ	larval survival	0.01	-

Paramètres de référence utilisés dans les simulations

Simulation : modèle original



Densités de population selon le modèle original au cours du temps

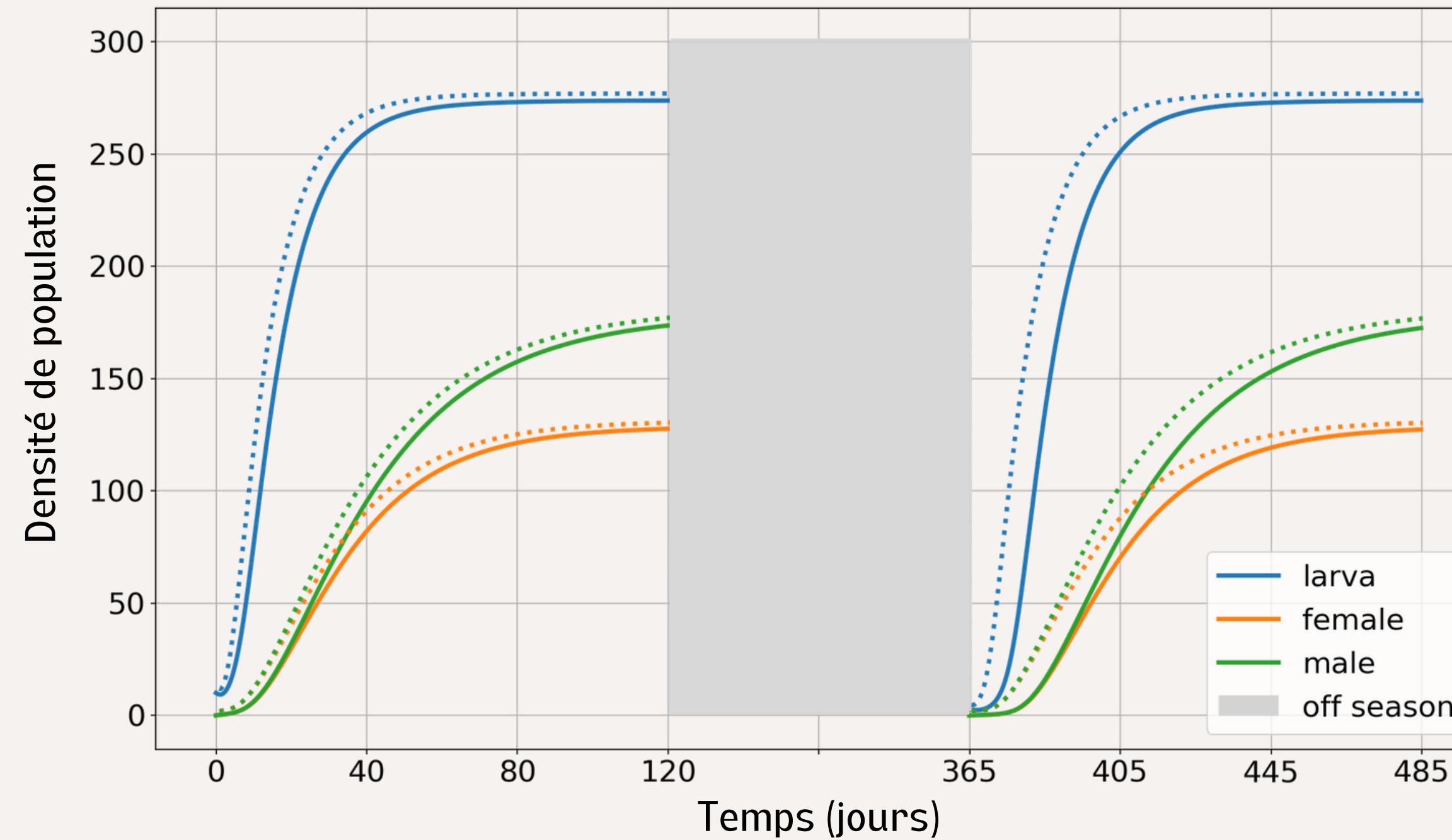
$$\frac{M}{k+M}$$

compliqué à analyser
mathématiquement

Hypothèse :

Mâles non limitants
dans la reproduction

Simulation : modèle original vs. simplifié



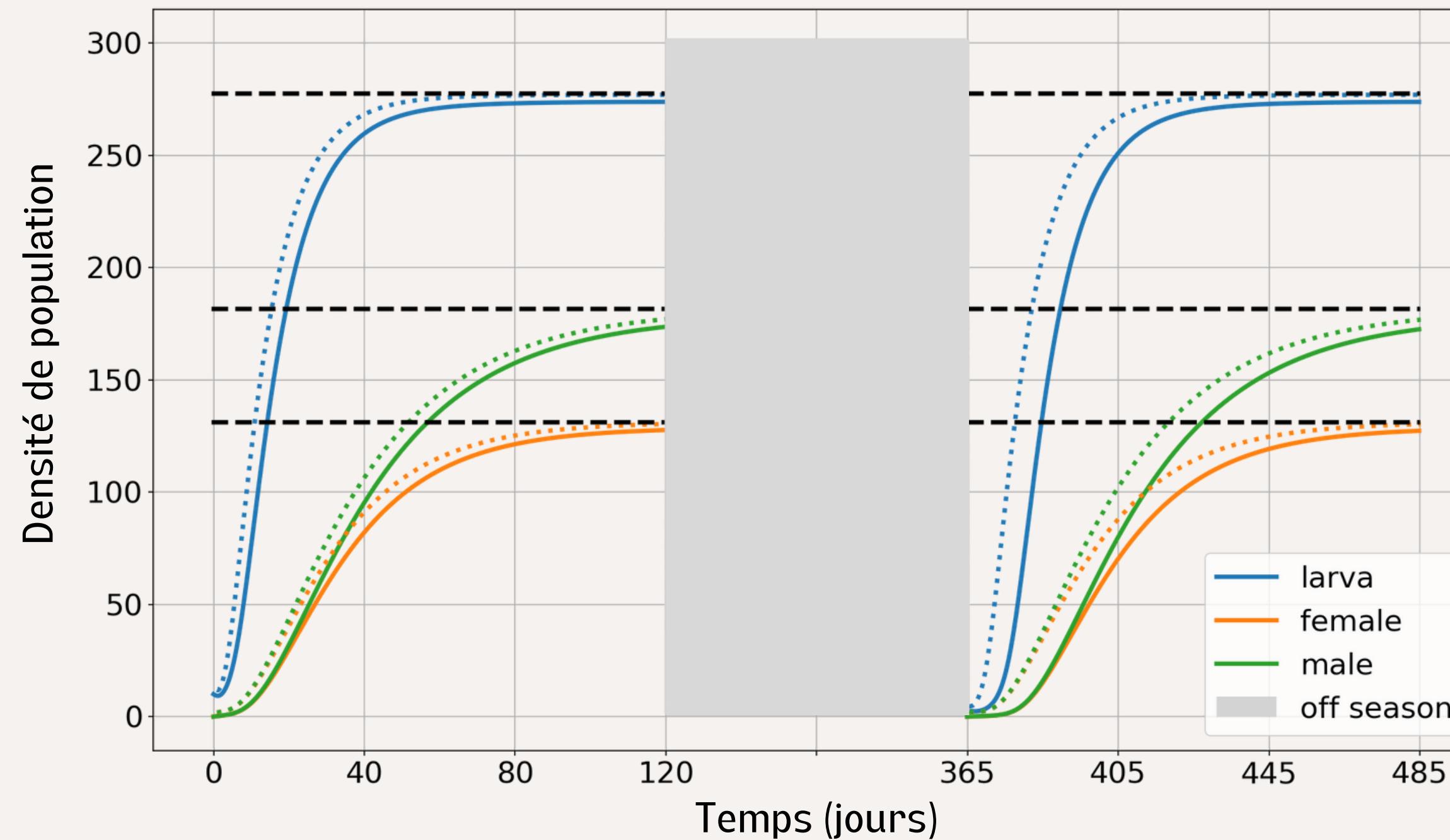
Densités de population selon 2 modèles au cours du temps
Courbes pleines : modèle original. Courbes pointillées : modèle simplifié.

$$\frac{M}{k+M} \approx 1$$

=
Dynamiques similaires

=
Approximation raisonnable

Modèle simplifié et équilibres



Densités de population selon 2 modèles au cours du temps
Courbes pleines : modèle original. **Courbes pointillées** : modèle simplifié.

Équilibre en 1 saison

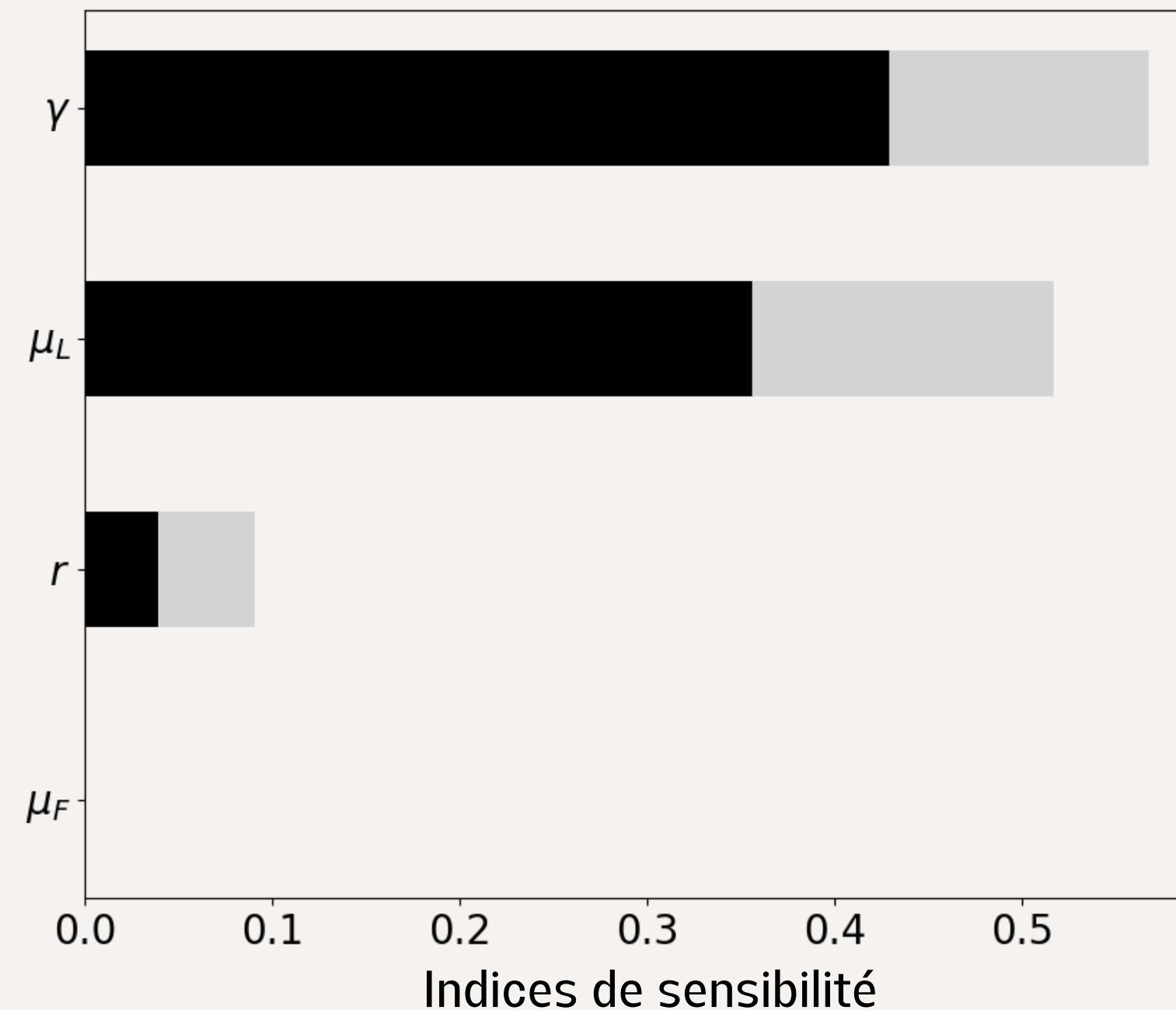
R = nombre de reproduction de base

$$R = \frac{\gamma(1-p)r}{\mu_F(\mu_L+r)}$$

- si $R < 1$: extinction
- si $R > 1$: persistance

Avec les paramètres de référence : $R = 111$

Analyse de sensibilité : Influence des paramètres



Influence des paramètres sur la densité de larves à la fin de la saison

Influence de γ r μ_L μ_F sur :
la densité des larves à la fin de la saison

3 valeurs : [min - référence - max]

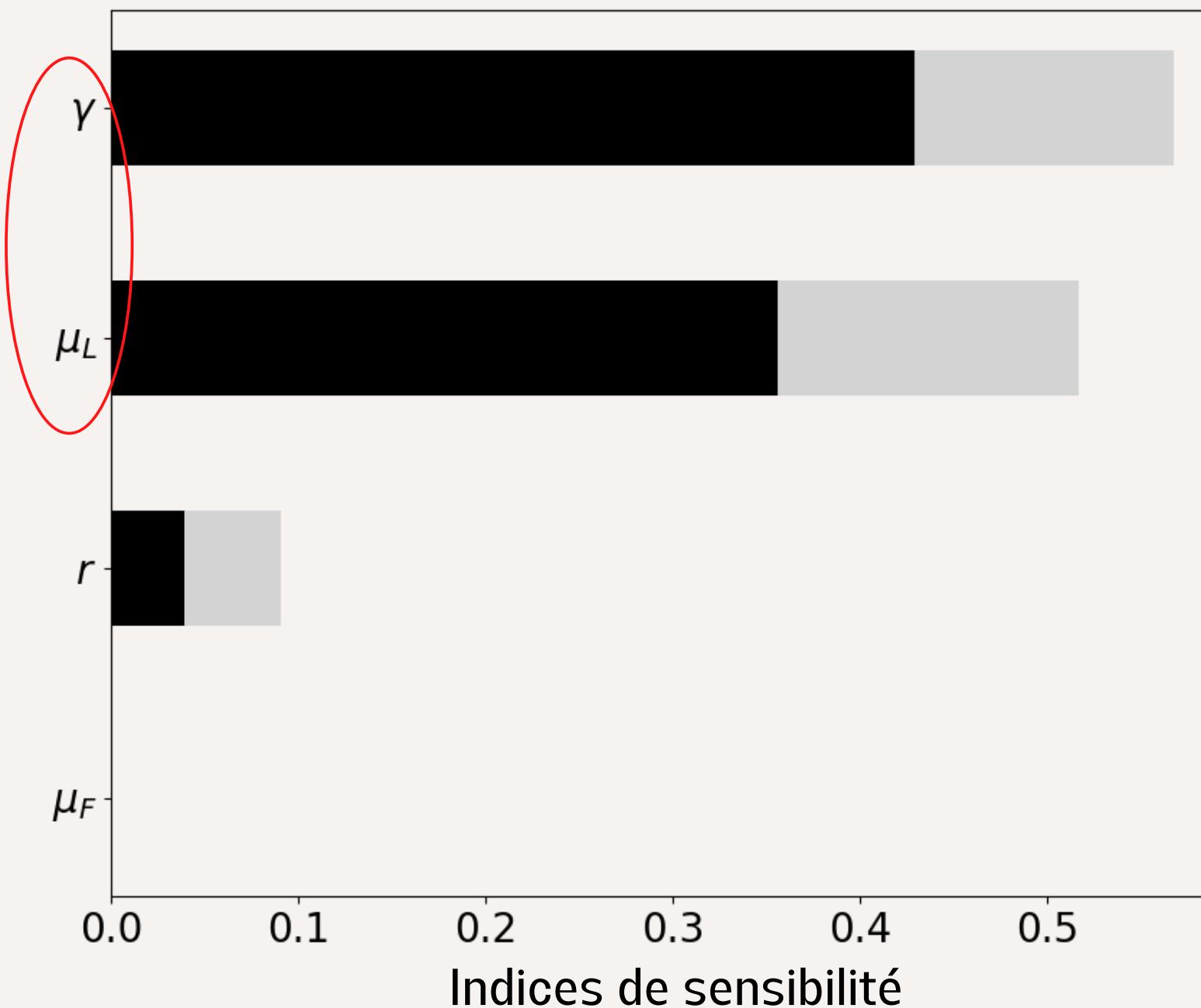
Plan factoriel complet :

Méthode basée sur l'ANOVA

Indices de Sobol :

- Indice de sensibilité
- Indice de sensibilité total

Analyse de sensibilité : Influence des paramètres



Taux de ponte : γ

Mortalité larvaire : μ_L

= la plus grande influence sur
la densité de larve en fin de saison

→ 2 leviers d'action pour contrôler
l'infestation de *Ceratitis capitata*

Influence des paramètres sur la densité de larves à la fin de la saison. ■ Indice de sensibilité ■ Indice de sensibilité total

Introduction de mâles stériles : une première approche

$$\begin{cases} \dot{L} = \gamma \frac{M}{k + M} C(\beta F) F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1 - p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{cases}$$

- Introduction de mâles stériles M_S
- M_S varie de 0 à 100

$$\begin{cases} \dot{L} = \gamma \frac{M}{k + M + M_S} C(\beta F) F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1 - p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{cases}$$

Introduction de mâles stériles : une première approche

$$\begin{cases} \dot{L} = \gamma \frac{M}{k + M} C(\beta F) F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1 - p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{cases}$$


- Introduction de mâles stériles M_S
- M_S varie de 0 à 100

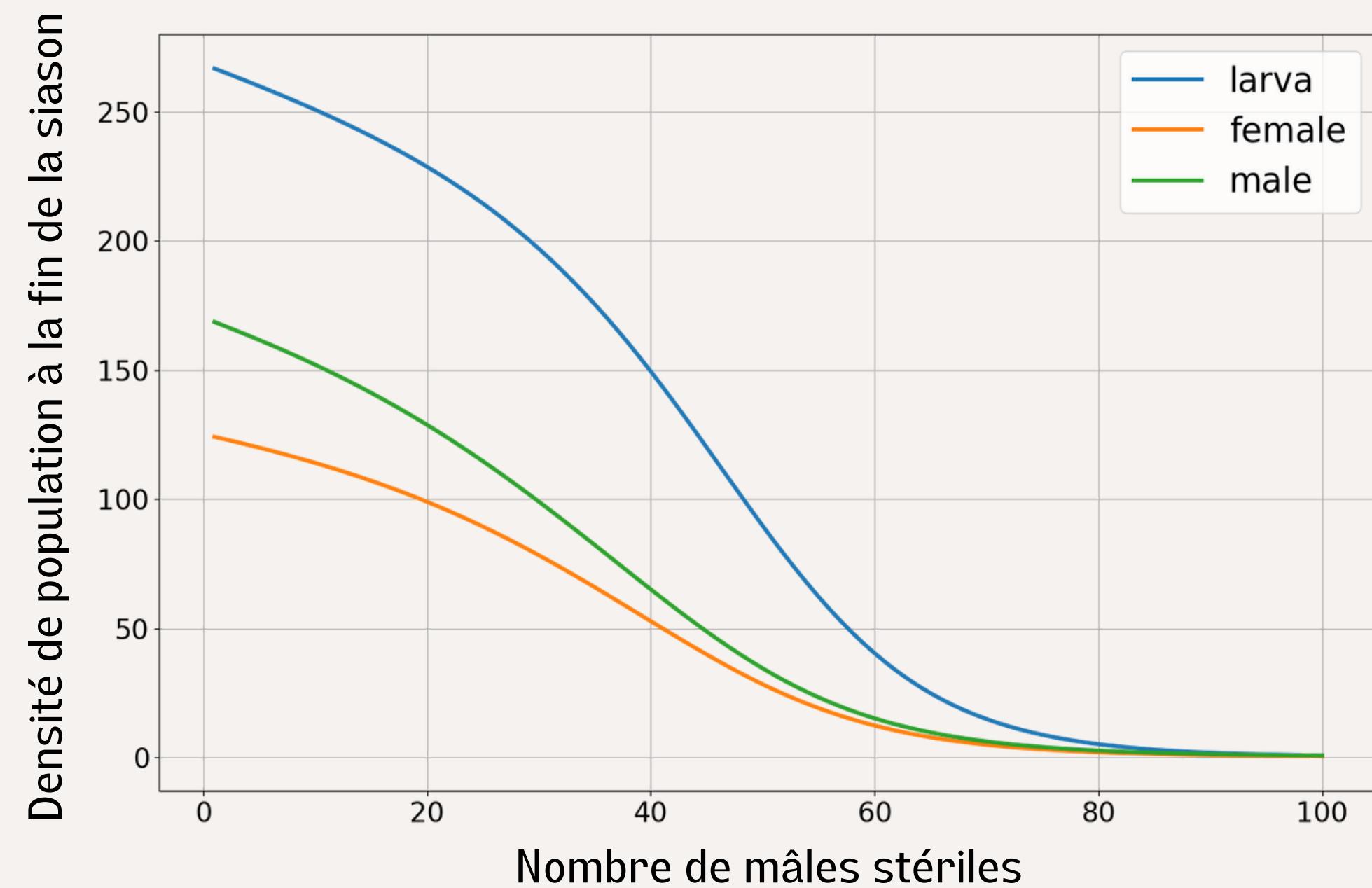
$$\begin{cases} \dot{L} = \gamma \frac{M}{k + M + M_S} C(\beta F) F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1 - p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{cases}$$

Introduction de mâles stériles : une première approche

On s'intéresse aux **densités de population à la fin de la saison**

Hypothèse :

Le nombre de mâles stériles reste constant tout au long de la saison



Densités de population à la fin de la saison

Introduction de mâles stériles : une première approche

On s'intéresse aux **densités de population à la fin de la saison**

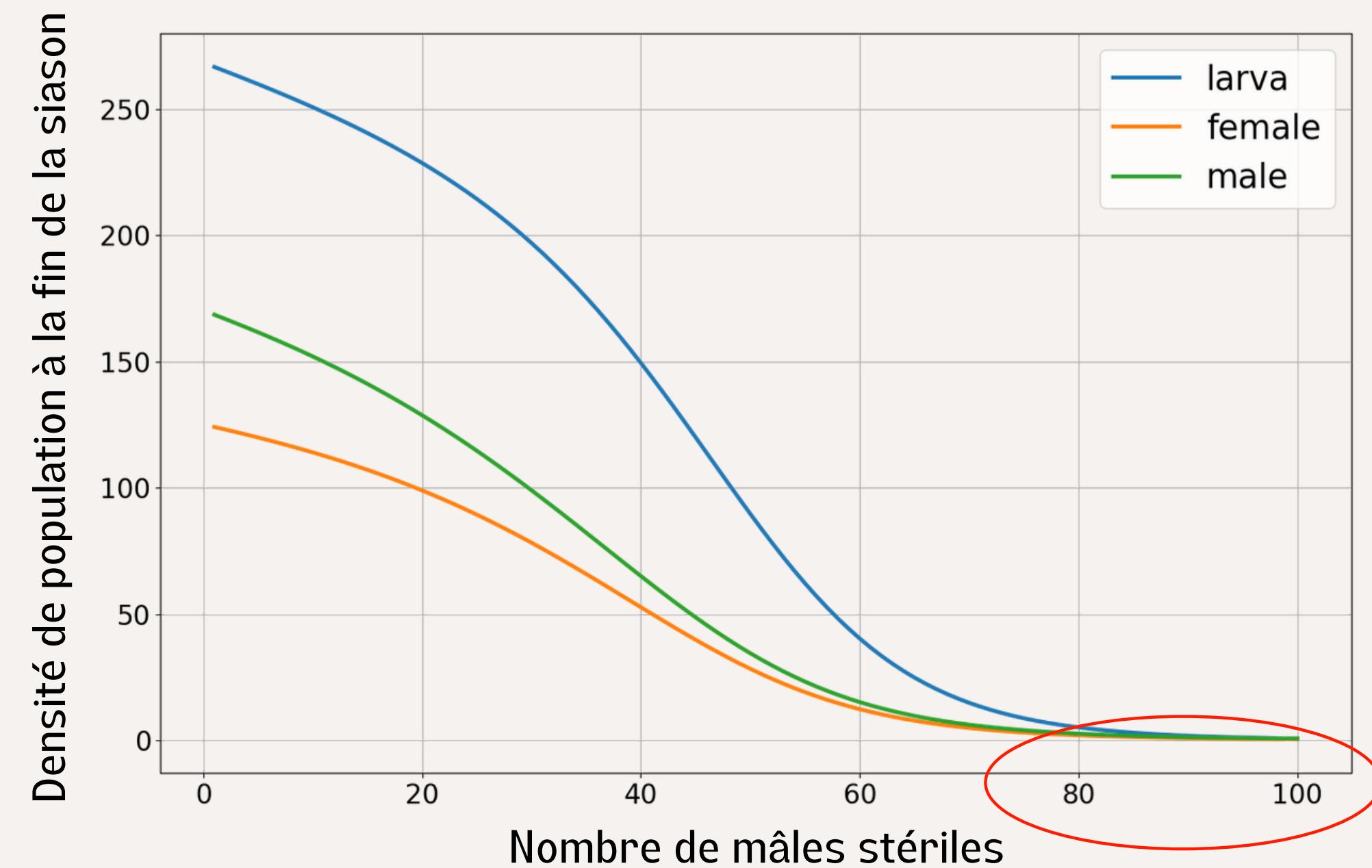
Hypothèse :

Le nombre de mâles stériles reste constant tout au long de la saison

Entre 80 et 100 mâles stériles

=

effondrement de la population



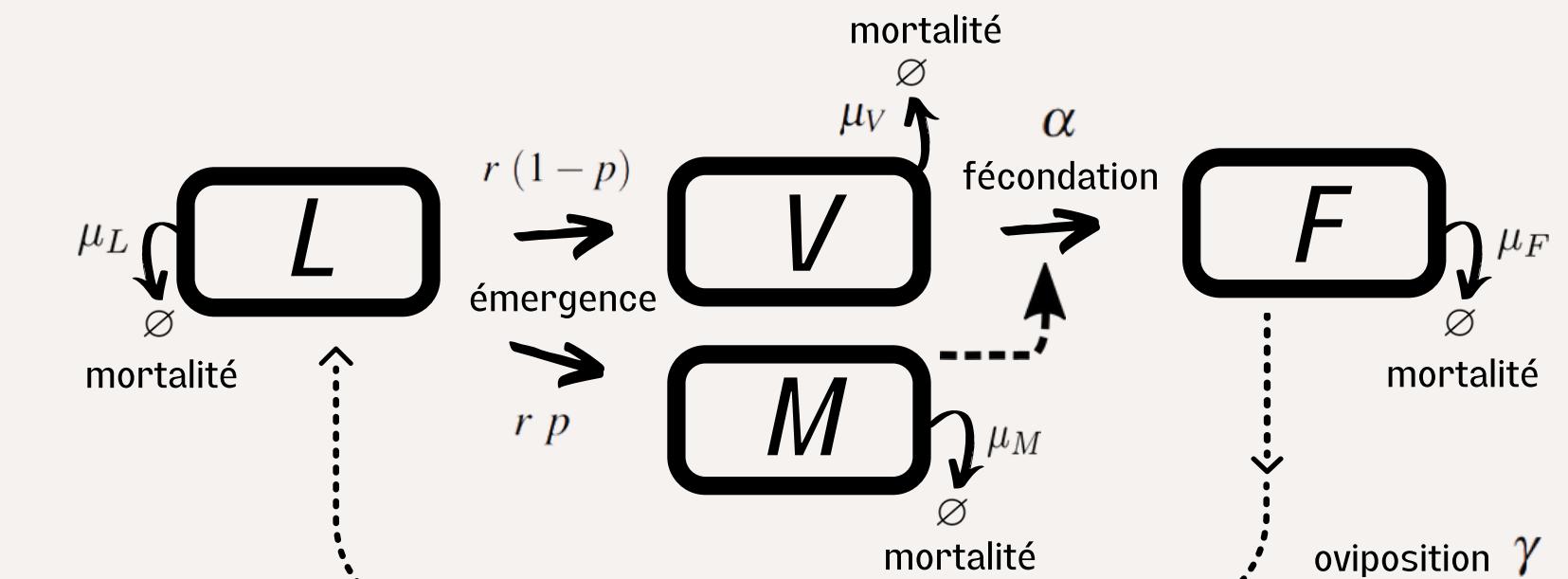
Densités de population à la fin de la saison

Perspectives du stage :

Première étape du projet :

- Caractériser les dynamiques

Modèle 4 compartiments non présenté



Prochaine étape : Raffiner la modélisation

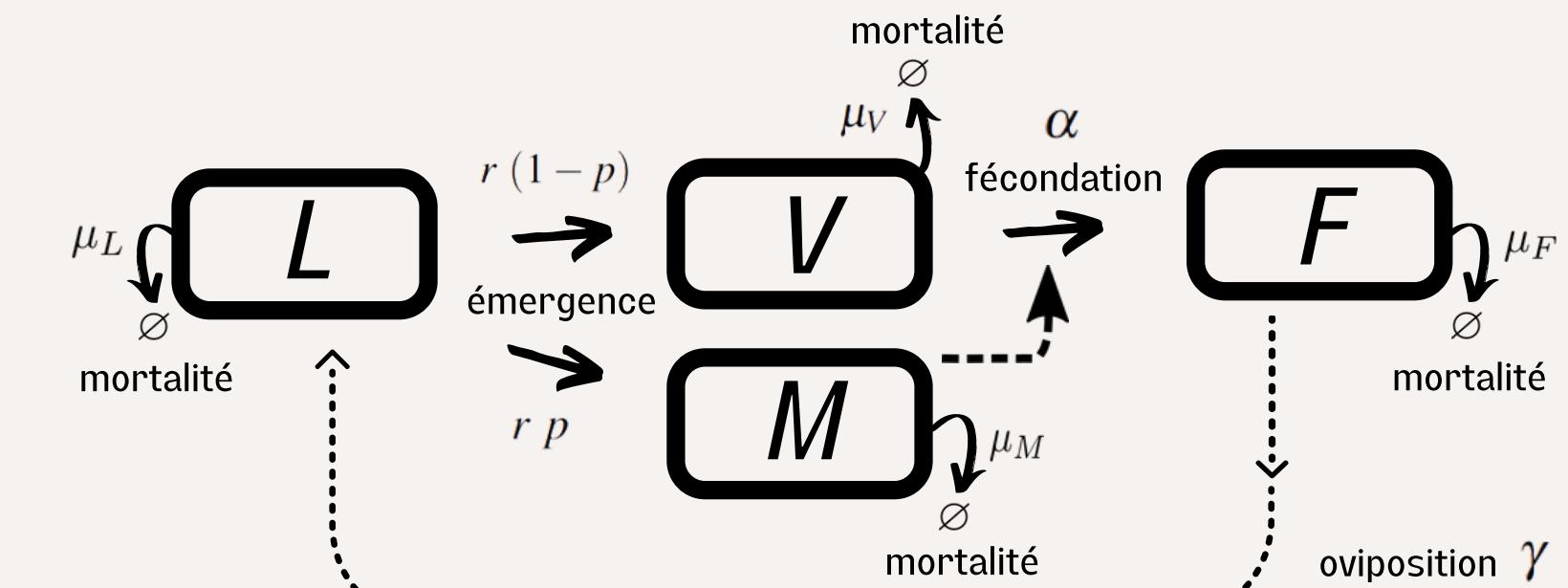
- Comparaison modèle 3 compartiments et 4 compartiments
- Analyse plus approfondis du modèle original
- Analyse de sensibilité sur la dynamique (ACP + ANOVA)

Perspectives du stage :

Première étape du projet :

- Caractériser les dynamiques

Modèle 4 compartiments non présenté



Prochaine étape : Raffiner la modélisation

- Comparaison modèle 3 compartiments et 4 compartiments
- Analyse plus approfondis du modèle original
- Analyse de sensibilité sur la dynamique (ACP + ANOVA)

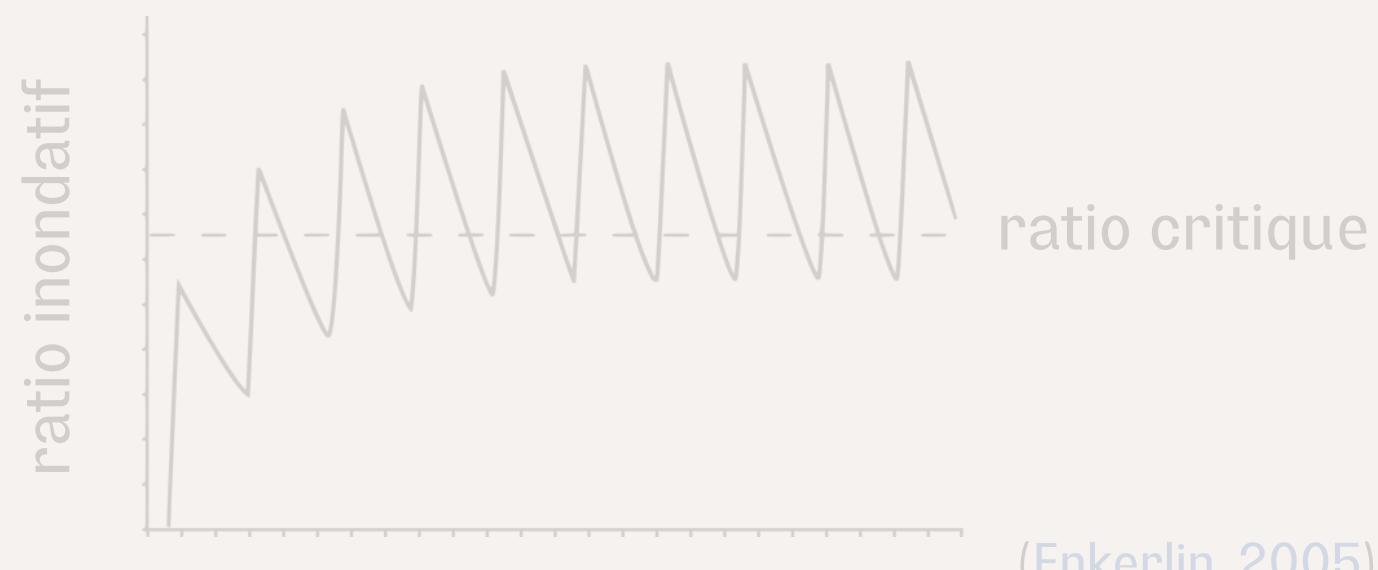
Perspectives du projet :

Prochaine étape du projet :

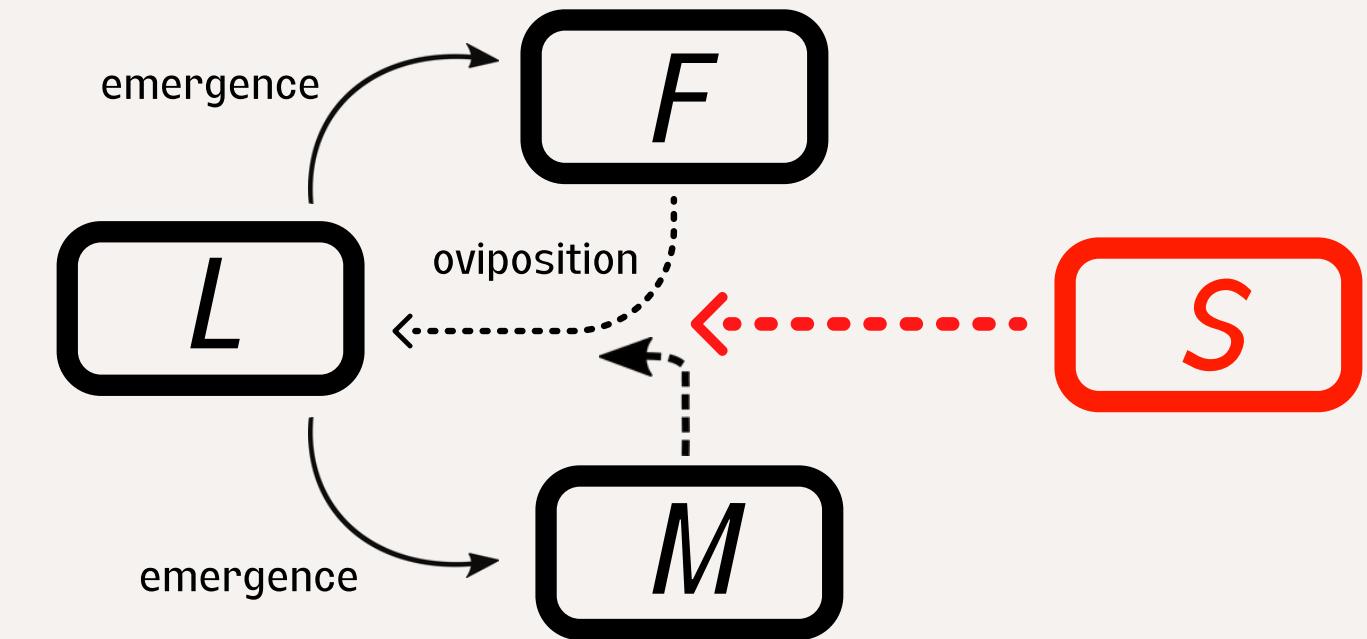
- Intégrer un compartiment mâles stériles

Pour tester des :

- stratégies de lâchers
- seuils de lâchers



(Enkerlin, 2005)



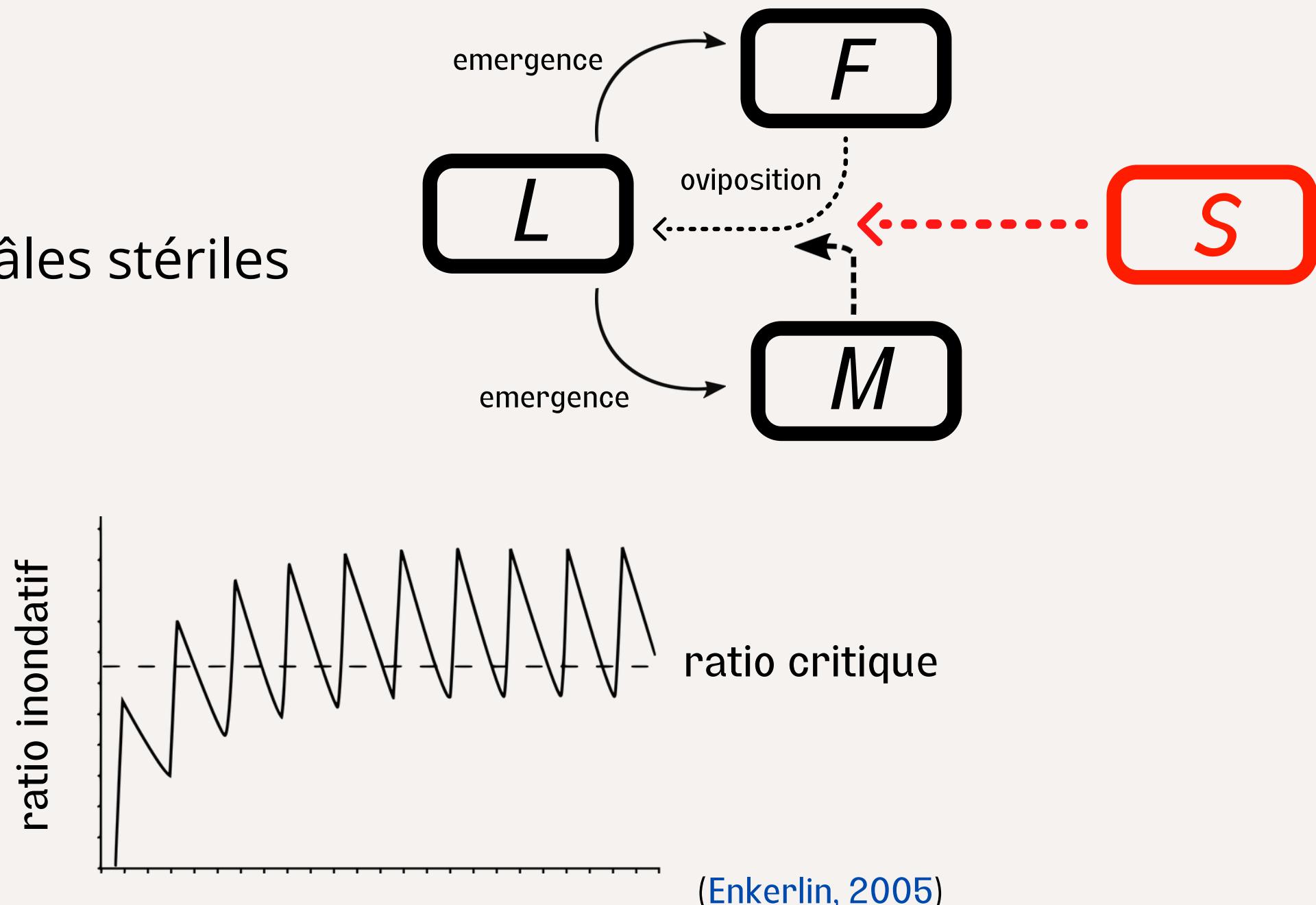
Perspectives du projet :

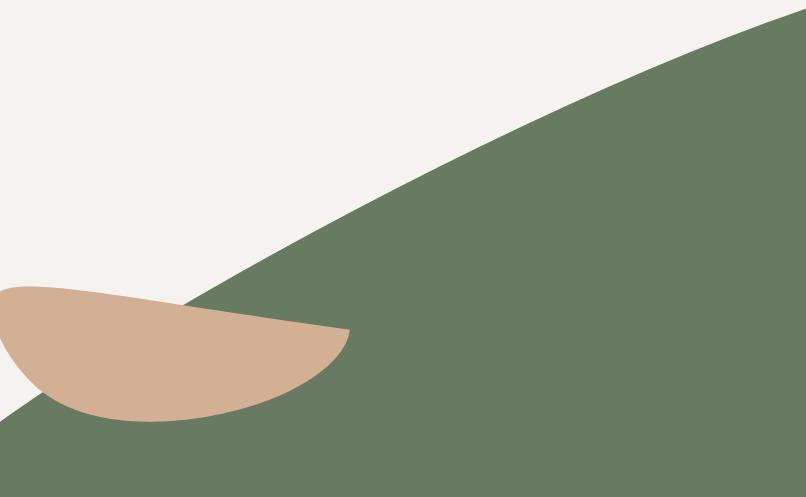
Prochaine étape du projet :

- Intégrer un compartiment mâles stériles

Pour tester des :

- stratégies de lâchers
- seuils de lâchers



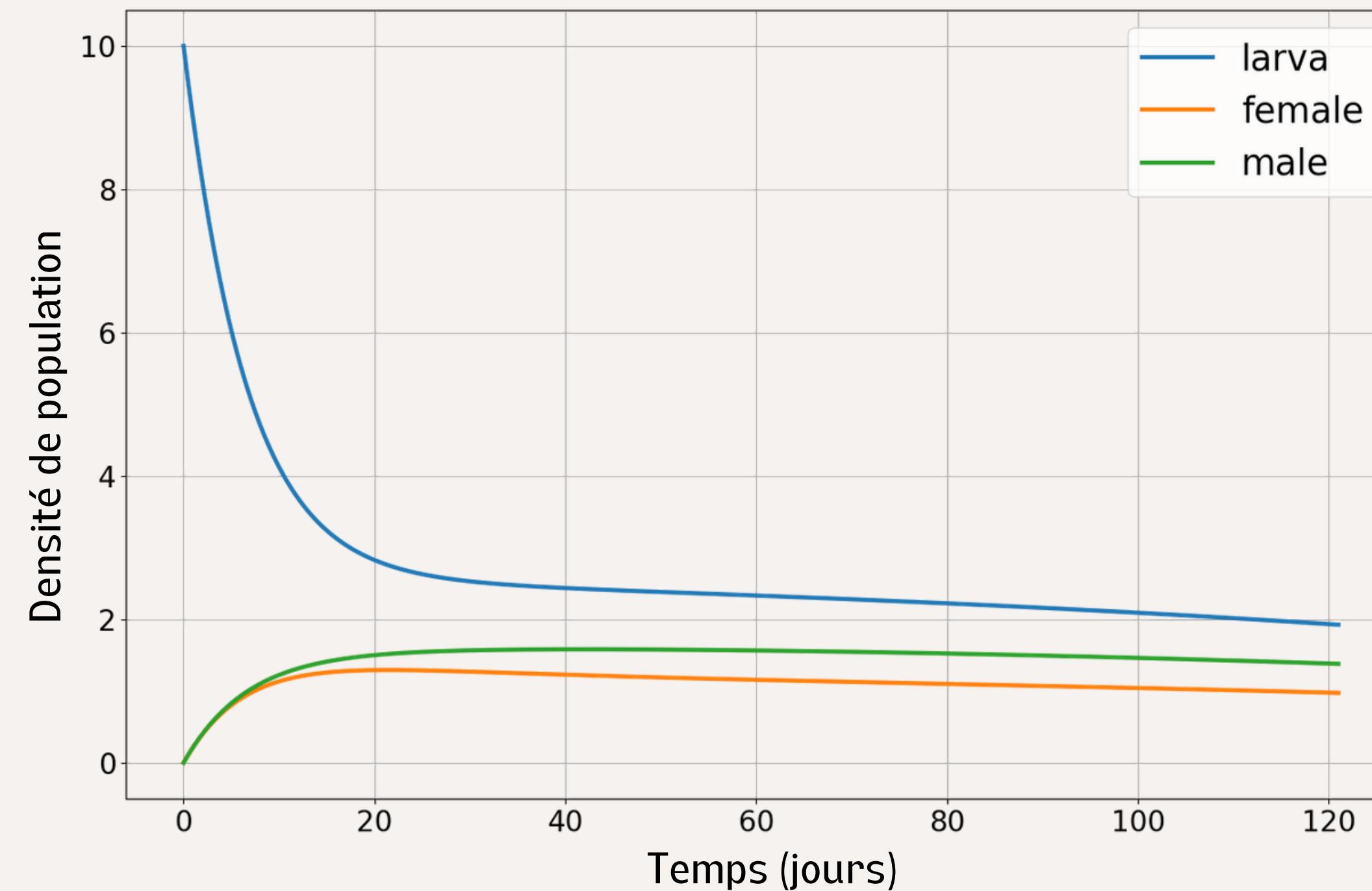


Merci pour votre attention

Références bibliographiques

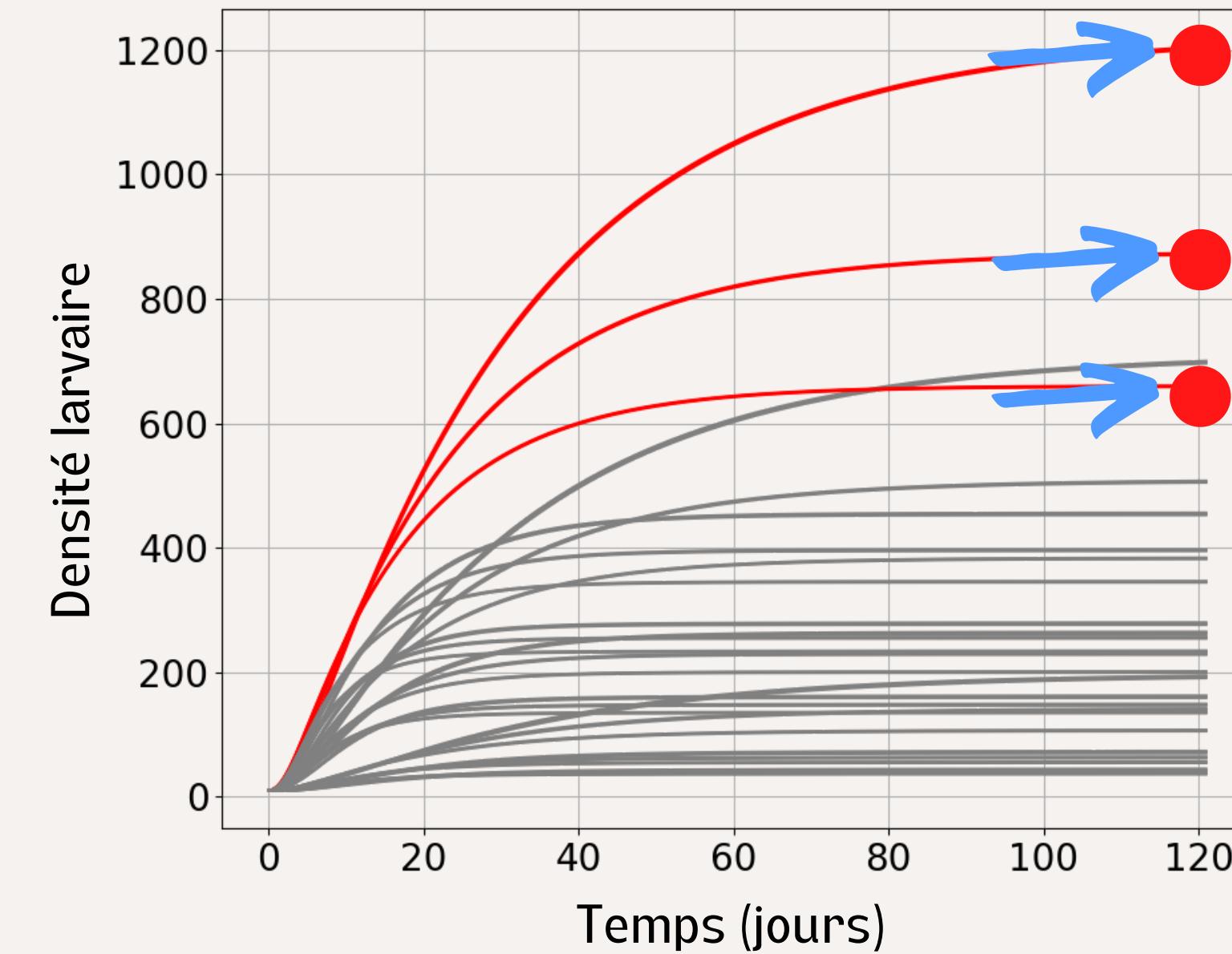
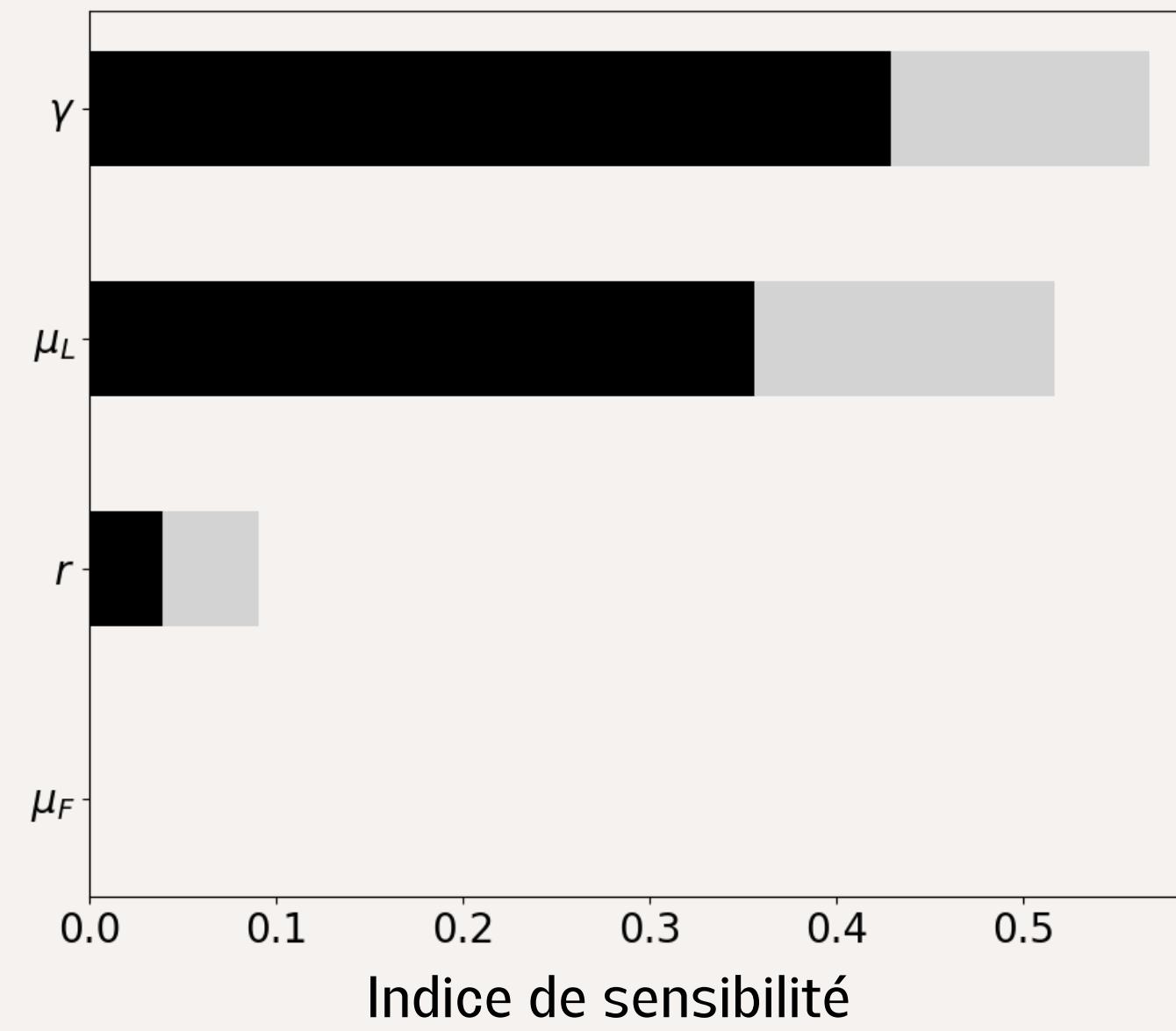
- **Back, E. A., & Pemberton, C. E.** (1918). The Mediterranean fruit fly in Hawaii (No. 536). US Department of Agriculture.
- **Christenson, L. D., & Foote, R. H.** (1960). Biology of fruit flies. Annual review of entomology, 5(1), 171-192.
- **Enkerlin, W. R., Dyck, V. A., Hendrichs, J., & Robinson, A. S.** (2005). Impact of fruit fly control programmes using the sterile insect technique. *Sterile Insect*, 979.
- **Gjullin, C. M.** (1931). Probable distribution of the Mediterranean fruit fly (*Ceratitis capitata* Weid.) in the United States. *Ecology*, 12(2), 248-258.
- **Liquid, N. J., Cunningham, R. T., & Nakagawa, S.** (1990). Host plants of Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) on the Island of Hawaii (1949-1985 survey). *Journal of Economic Entomology*, 83(5), 1863-1878.
- **McDonald, P. T., & McInnis, D. O.** (1985). *Ceratitis capitata*: effect of host fruit size on the number of eggs per clutch. *Entomologia experimentalis et applicata*, 37(3), 207-211.
- **Messenger, P. S.** (1959). Bioclimatic studies with insects. *Annual Review of Entomology*, 4(1), 183-206.
- **Michelakis, S. E.** (1992). Phenology of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* Wiedemann in Crete. *Isr J Entomol*, 25, 177-180.
- **Prokopy, R. J., & Hendrichs, J.** (1979). Mating behavior of *Ceratitis capitata* on a field-caged host tree. *Annals of the Entomological Society of America*, 72(5), 642-648.
- **Stonehouse, J. M., Mumford, J. D., & Mustafa, G.** (1998). Economic losses to tephritid fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Pakistan. *Crop Protection*, 17(2), 159-164.
- **Thomas, M. C., Heppner, J. B., Woodruff, R. E., Weems, H. V., Steck, G. J., & Fasulo, T. R.** (2004). Mediterranean Fruit Fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann)(Insecta: Diptera: Tephritidae). EDIS, 2004(8).
- **Vargas, R. I., Walsh, W. A., Kanehisa, D., Stark, J. D., & Nishida, T.** (2000). Comparative demography of three Hawaiian fruit flies (Diptera: Tephritidae) at alternating temperatures. *Annals of the Entomological Society of America*, 93(1), 75-81.
- **Whittier, T. S., & Kaneshiro, K. Y.** (1995). Intersexual selection in the Mediterranean fruit fly: does female choice enhance fitness?. *Evolution*, 49(5), 990-996.

Annexes : Introduction de mâles stériles



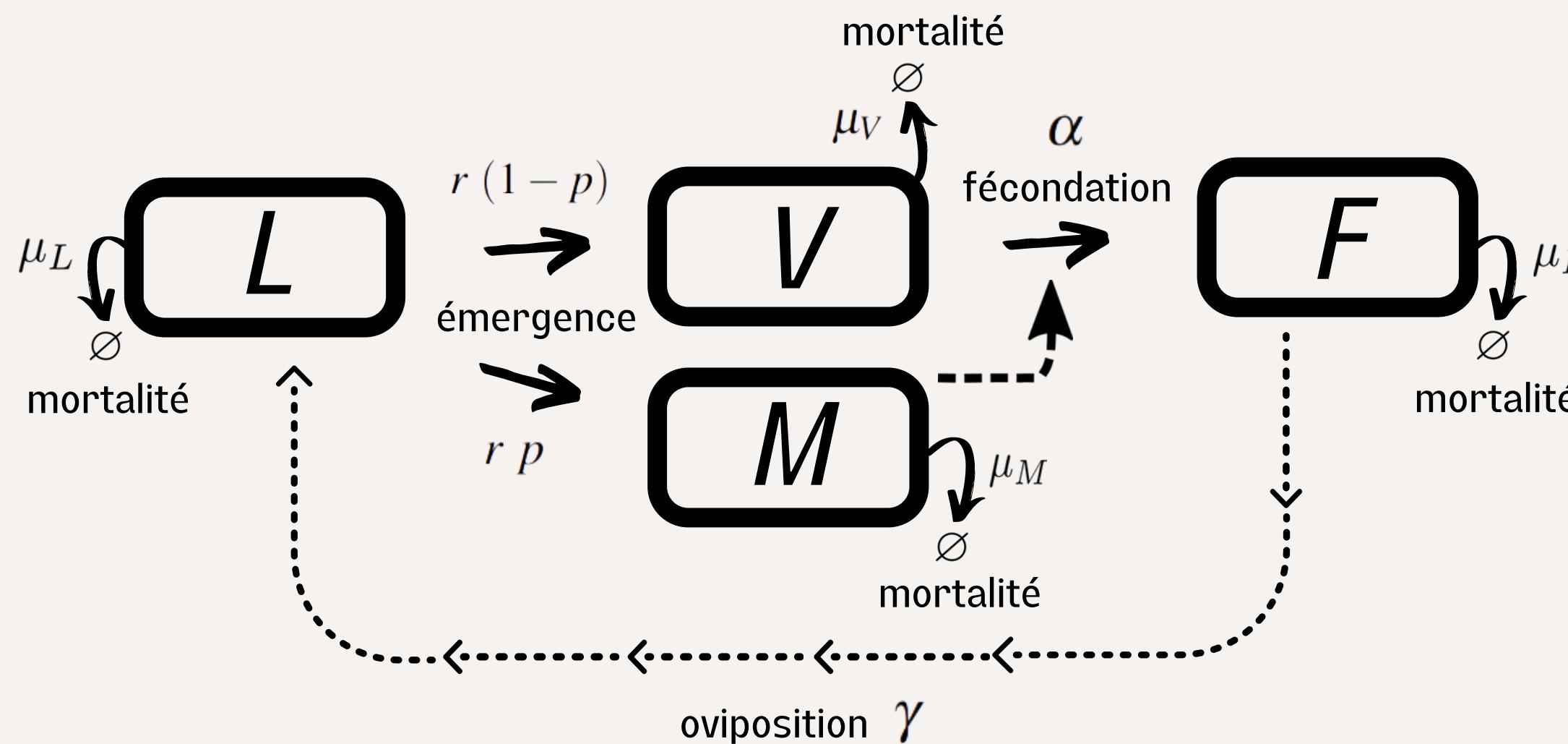
Densités de population au cours d'une saison avec 90 mâles stériles

Annexes : Analyse de sensibilité et densités larvaires



γ μ_L  2 leviers d'action pour contrôler *Ceratitis capitata*

Annexes : Modèle 4 compartiments



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{L} = \gamma C(\beta F) F - r L - \mu_L L, \\ \dot{V} = r (1-p) L - \alpha \frac{M}{k+M} V - \mu_V V, \\ \dot{M} = r p L - \mu_M M, \\ \dot{F} = \alpha \frac{M}{k+M} V - \mu_F F \end{array} \right.$$

Annexes : Modèle sans échelle indépendant du paramètre β

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{L} = \frac{\gamma M}{k + M} C(\beta F) F - rL - \mu_L L, \\ \dot{F} = r(1 - p)L - \mu_F F, \\ \dot{M} = rpL - \mu_M M. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{l} = \gamma C(f)f - (\mu_L + r)l \\ \dot{f} = r(1 - p)l - \mu_F f \\ \dot{m} = rpl - \mu_M m \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{l} = \beta \dot{L} \\ \dot{f} = \beta \dot{F} \\ \dot{m} = \beta \dot{M} \end{array} \right.$$

Annexes : Mise à l'échelle du système

