

Mouvements collectifs et plasticité phénotypique : étude du polyphénisme de phase des locustes à plusieurs échelles spatio-temporelles

Camille Vernier

Membres du Jury :

Elodie VERCKEN	(Rapportrice)
Mathieu LIHOREAU	(Rapporteur)
Philippe TIXIER	(Examineur)
Cyril PIOU	(Directeur de thèse)
Marie-Pierre CHAPUIS	(Co-encadrante)
Jean-Pierre ROSSI	(Co-encadrant)



Introduction - Les coûts et bénéfices de la vie en groupe



(Krause et al., 2002)

Introduction - Les coûts et bénéfices de la vie en groupe



Coûts

- transmission des pathogènes
- risque de détection plus élevé
- compétition accrue

(Krause et al., 2002)

Introduction - Les coûts et bénéfices de la vie en groupe



Coûts

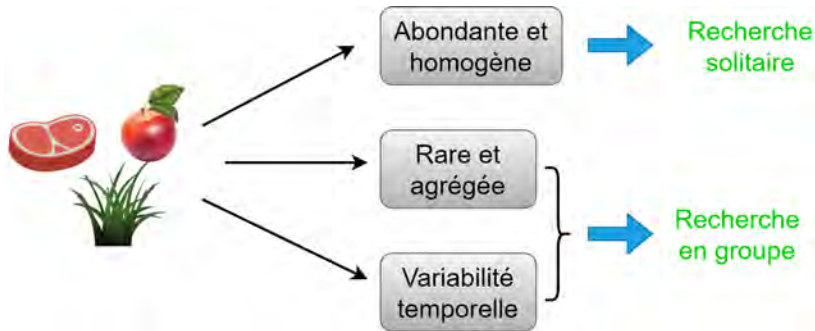
- transmission des pathogènes
- risque de détection plus élevé
- compétition accrue

Bénéfices

- thermorégulation du groupe
- défense contre les prédateurs
- recherche de nourriture

(Krause et al., 2002)

Recherche collective de nourriture et distribution de la ressource



(Reuter et al., 2016 ; Lihoreau et al., 2017, Egert-Berg et al., 2018)

Les mouvements collectifs et leur modélisation



La plupart des espèces animales vivant en groupe présentent des patrons de déplacements coordonnés complexes

La modélisation a permis une meilleure compréhension des mécanismes permettant les mouvements collectifs

La plupart des patrons peuvent être reproduits sans nécessiter de leader

(Couzin et Krause, 2003)

Les mouvements collectifs des locustes grégaires



Bande larvaire et essaim de *Schistocerca gregaria*

(Uvarov, 1977 ; Pener et Simpson, 2009)

Le polyphénisme de phase des locustes

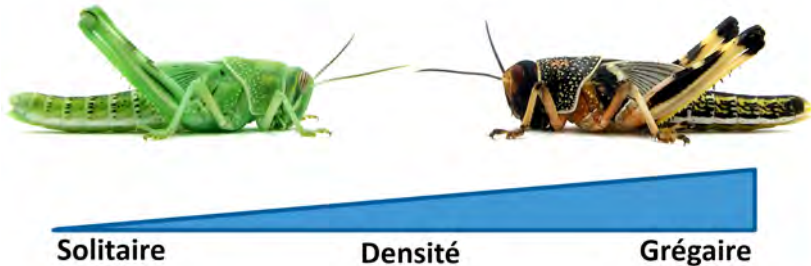
- **Locustes** = acridiens pouvant former des essaims et présentant du polyphénisme de phase
- **Polyphénisme de phase** = plasticité phénotypique extrême



Larves *Schistocerca gregaria* solitaire (à gauche) et grégaire (à droite)

(Uvarov, 1977 ; Pener et Simpson, 2009)

Le polyphénisme de phase des locustes



Le changement de phase est densité dépendant
Modifications comportementales atteintes en quelques heures
Phénotypes extrêmes atteints après plusieurs générations

(Uvarov, 1977 ; Pener et Simpson, 2009)

Des conséquences humaines, écologiques et économiques



Crise de 2020 en Afrique de l'Est : 70 000 ha détruits au Kenya et 200 000 ha en Ethiopie par un essaim d'une étendue de 2400 m²
(FAO, Associated Press)

Des conséquences humaines, écologiques et économiques



Crise de 2020 : 2 millions d'ha traités par 28 avions pour un coût de 191 millions \$

(FAO)

Etat de l'art sur les mouvements collectifs des locustes

Importance d'une meilleure compréhension des facteurs favorisant l'apparition des groupes et leurs déplacements

(Ellis et Ashall, 1957 ; Uvarov, 1977)

Etat de l'art sur les mouvements collectifs des locustes

Importance d'une meilleure compréhension des facteurs favorisant l'apparition des groupes et leurs déplacements

Plusieurs études ont permis de mieux comprendre les déplacements collectifs des locustes, et notamment des bandes larvaires :

(Ellis et Ashall, 1957 ; Uvarov, 1977)

Etat de l'art sur les mouvements collectifs des locustes

Importance d'une meilleure compréhension des facteurs favorisant l'apparition des groupes et leurs déplacements

Plusieurs études ont permis de mieux comprendre les déplacements collectifs des locustes, et notamment des bandes larvaires :

- Les caractéristiques de déplacement des bandes (forme, vitesse...)

(Ellis et Ashall, 1957 ; Uvarov, 1977)

Etat de l'art sur les mouvements collectifs des locustes

Importance d'une meilleure compréhension des facteurs favorisant l'apparition des groupes et leurs déplacements

Plusieurs études ont permis de mieux comprendre les déplacements collectifs des locustes, et notamment des bandes larvaires :

- Les caractéristiques de déplacement des bandes (forme, vitesse...)
- Les larves suivent des cycles comportementaux quotidien, avec des phases de marche et des phases de repos

(Ellis et Ashall, 1957 ; Uvarov, 1977)

Etat de l'art sur les mouvements collectifs des locustes

Importance d'une meilleure compréhension des facteurs favorisant l'apparition des groupes et leurs déplacements

Plusieurs études ont permis de mieux comprendre les déplacements collectifs des locustes, et notamment des bandes larvaires :

- Les caractéristiques de déplacement des bandes (forme, vitesse...)
- Les larves suivent des cycles comportementaux quotidien, avec des phases de marche et des phases de repos
- La direction peut être maintenue plusieurs jours de suite

(Ellis et Ashall, 1957 ; Uvarov, 1977)

Etat de l'art sur les mouvements collectifs des locustes

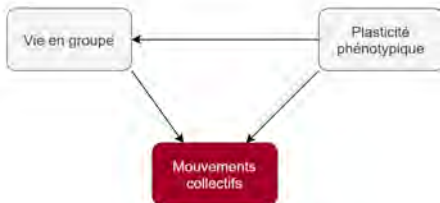
Importance d'une meilleure compréhension des facteurs favorisant l'apparition des groupes et leurs déplacements

Plusieurs études ont permis de mieux comprendre les déplacements collectifs des locustes, et notamment des bandes larvaires :

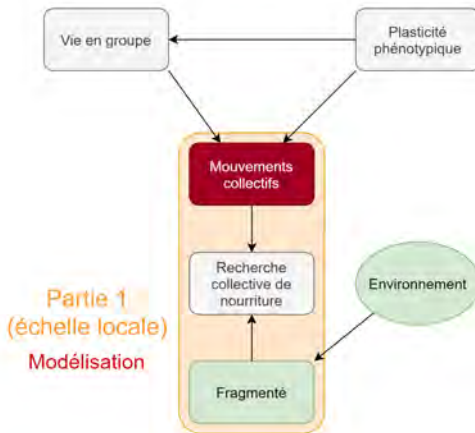
- Les caractéristiques de déplacement des bandes (forme, vitesse...)
- Les larves suivent des cycles comportementaux quotidien, avec des phases de marche et des phases de repos
- La direction peut être maintenue plusieurs jours de suite
- Plusieurs bandes larvaires peuvent fusionner ou se reformer après séparation

(Ellis et Ashall, 1957 ; Uvarov, 1977)

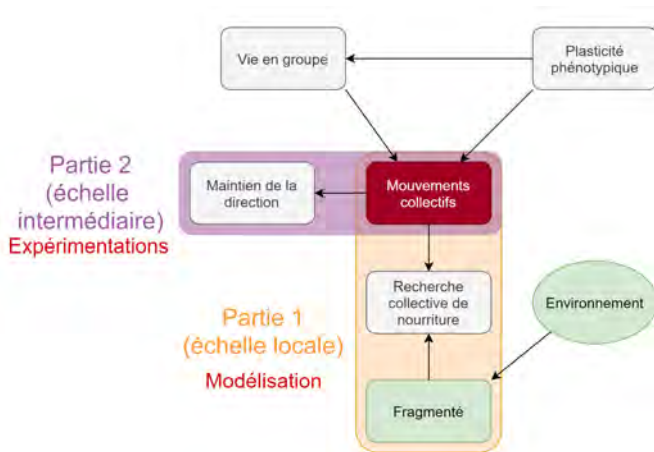
Objectifs de la thèse



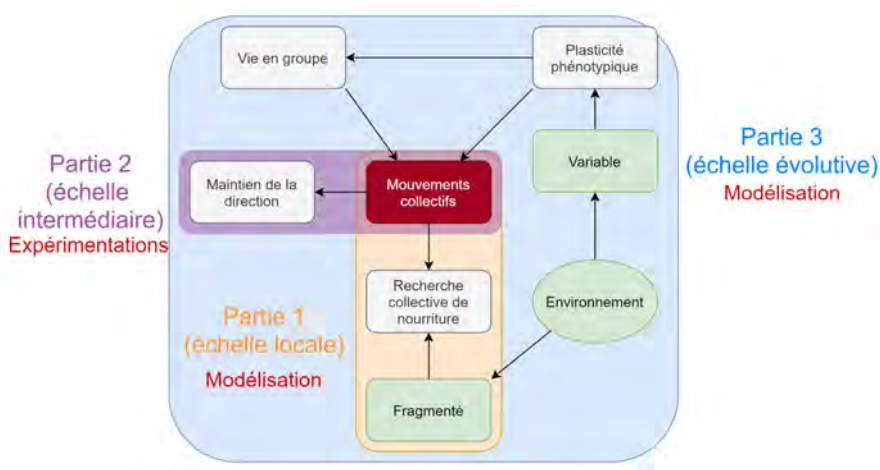
Objectifs de la thèse



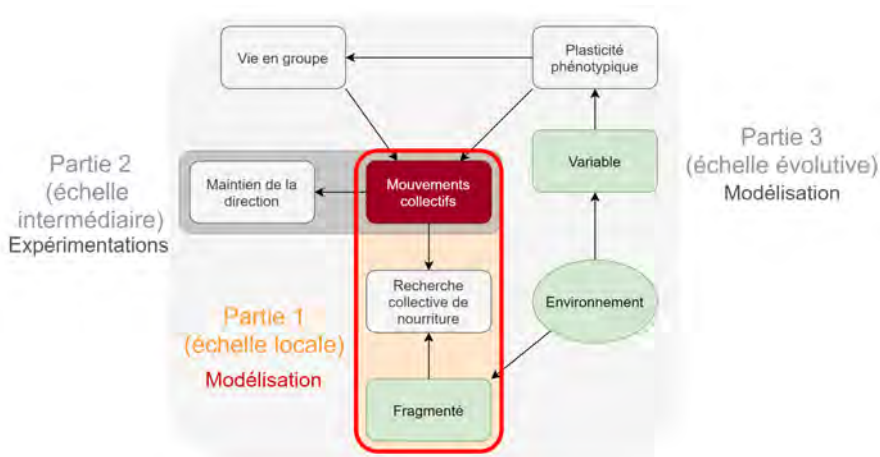
Objectifs de la thèse



Objectifs de la thèse



Objectifs de la thèse



Introduction

Le lien entre structuration du paysage et les déplacements de groupes a peu été exploré

(Georgiou et al., 2021, 2022)

Introduction

Le lien entre structuration du paysage et les déplacements de groupes a peu été exploré

Modèles analytiques de Georgiou et al. (2021, 2022) : comparent efficacité grégaires / solitaires en situation de compétition directe, dans des environnements à hétérogénéité variable :

(Georgiou et al., 2021, 2022)

Introduction

Le lien entre structuration du paysage et les déplacements de groupes a peu été exploré

Modèles analytiques de Georgiou et al. (2021, 2022) : comparent efficacité grégaires / solitaires en situation de compétition directe, dans des environnements à hétérogénéité variable :

- Plus la proportion de grégaires est grande, plus il est avantageux d'être grégaire

(Georgiou et al., 2021, 2022)

Introduction

Le lien entre structuration du paysage et les déplacements de groupes a peu été exploré

Modèles analytiques de Georgiou et al. (2021, 2022) : comparent efficacité grégaires / solitaires en situation de compétition directe, dans des environnements à hétérogénéité variable :

- Plus la proportion de grégaires est grande, plus il est avantageux d'être grégaire
- L'avantage diminue avec l'homogénéisation du paysage

(Georgiou et al., 2021, 2022)

Introduction

Le lien entre structuration du paysage et les déplacements de groupes a peu été exploré

Modèles analytiques de Georgiou et al. (2021, 2022) : comparent efficacité grégaires / solitaires en situation de compétition directe, dans des environnements à hétérogénéité variable :

- Plus la proportion de grégaires est grande, plus il est avantageux d'être grégaire
- L'avantage diminue avec l'homogénéisation du paysage

Pas de modélisation des mouvements collectifs, donc pas de prise en compte des caractéristiques de déplacement propres aux locustes (modèle analytique)

Contexte de compétition entre grégaires et solitaires

(Georgiou et al., 2021, 2022)

Objectifs

Explorer l'impact de la distribution spatiale de la ressource et des **interactions inter-individuelles** sur le succès de la recherche de nourriture des locustes, sans compétition directe entre grégaires et solitaires

Objectifs

Explorer l'impact de la distribution spatiale de la ressource et des **interactions inter-individuelles** sur le succès de la recherche de nourriture des locustes, sans compétition directe entre grégaires et solitaires

Pour quels types de paysages et pour quelles caractéristiques de déplacement les larves grégaires vont-elles être avantagées par rapport aux larves solitaires sur une demi-journée de marche ?

Objectifs

Explorer l'impact de la distribution spatiale de la ressource et des **interactions inter-individuelles** sur le succès de la recherche de nourriture des locustes, sans compétition directe entre grégaires et solitaires

Pour quels types de paysages et pour quelles caractéristiques de déplacement les larves grégaires vont-elles être avantagées par rapport aux larves solitaires sur une demi-journée de marche ?

⇒ Développement d'un modèle à base d'agent (ABM)

Les modèles à base d'agents (ABM)

ABM = modèle composé d'entités autonomes multiples ("agents") dotées d'attributs, de comportements, et de capacités de perception qui évoluent dans un environnement donné

Les modèles à base d'agents (ABM)

ABM = modèle composé d'entités autonomes multiples ("agents") dotées d'attributs, de comportements, et de capacités de perception qui évoluent dans un environnement donné

Permet de simuler des individus uniques et de suivre leurs interactions au cours du temps

⇒ Très adapté pour représenter des déplacements collectifs avec prise en compte des interactions individuelles

Les modèles à base d'agents (ABM)

ABM = modèle composé d'entités autonomes multiples ("agents") dotées d'attributs, de comportements, et de capacités de perception qui évoluent dans un environnement donné

Permet de simuler des individus uniques et de suivre leurs interactions au cours du temps

⇒ Très adapté pour représenter des déplacements collectifs avec prise en compte des interactions individuelles



Présentation des parties abordés

- Présentation du modèle et des agents
- Calibration (sélection des jeux de paramètres pour l'exploration)
- Exploration (mise en place et résultats)
- Conclusion et perspectives

Les agents du modèle

Cellules :



- Position (x, y)
- Ressources K

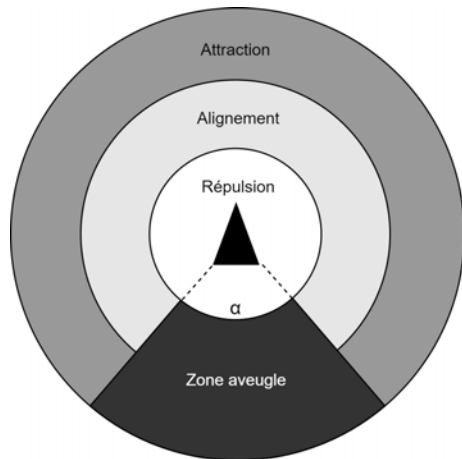
Locustes :



- Phase (fixe)
- Position (x, y)
- Orientation
- Vitesse S
- Énergie E
- Statut digestif
- Nombre de voisins
- Vecteur direction (direction suivie au pas de temps suivant)

Perception des locustes : le modèle à 3 zones

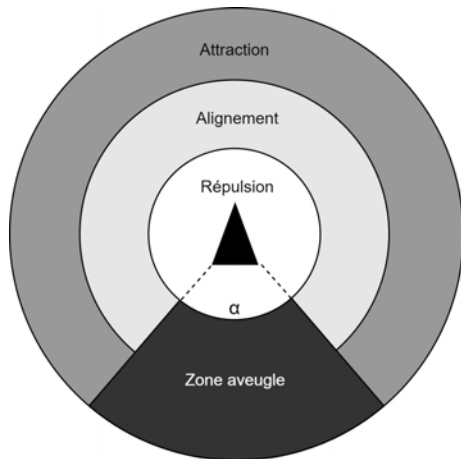
3 zones de perceptions, calcul de vecteurs forces associés



(Aoki, 1982 ; Couzin et al., 2002)

Perception des locustes : le modèle à 3 zones

3 zones de perceptions, calcul de vecteurs forces associés

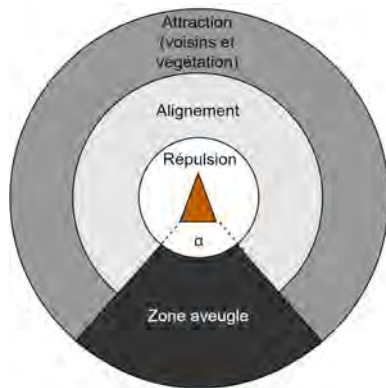


Avantages :

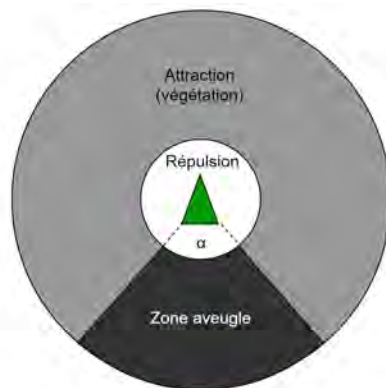
- Simple et facilement adaptable
- Modélise un grand nombre de type de déplacements
- Permet l'ajout de vecteurs forces additionnels

(Aoki, 1982 ; Couzin et al., 2002)

Perception des locustes : le modèle à 3 zones



Grégaires



Solitaires

Echelles du modèle

- 1 pas de temps = 10 s
- 1 simulation = 1000 pas de temps (\simeq 3h)
- 1 cellule du modèle = taille de 4 larves (\simeq 8 x 8 cm pour des L3)
- 800 x 800 cellules en tout, (\simeq 64 x 64 m pour des L3)
- Initialisation selon la phase

Diagramme d'activité d'un agent locuste



- (1) Manger : si la cellule actuelle contient de la végétation, $E \leftarrow E + 1$

Diagramme d'activité d'un agent locuste



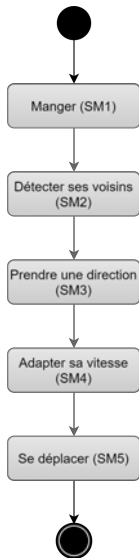
- (1) Manger : si la cellule actuelle contient de la végétation, $E \leftarrow E + 1$
- (2) Détecter ses voisins : mise à jour des individus présent dans chaque zone de perception

Diagramme d'activité d'un agent locuste



- (1) Manger : si la cellule actuelle contient de la végétation, $E \leftarrow E + 1$
- (2) Détecter ses voisins : mise à jour des individus présent dans chaque zone de perception
- (3) Prendre une direction : calcul de la nouvelle direction, en fonction des voisins

Diagramme d'activité d'un agent locuste



- (1) Manger : si la cellule actuelle contient de la végétation, $E \leftarrow E + 1$
- (2) Détecter ses voisins : mise à jour des individus présent dans chaque zone de perception
- (3) Prendre une direction : calcul de la nouvelle direction, en fonction des voisins
- (4) Adapter sa vitesse : en fonction du statut digestif et de l'éloignement au groupe pour les grégaires

Diagramme d'activité d'un agent locuste



- (1) Manger : si la cellule actuelle contient de la végétation, $E \leftarrow E + 1$
- (2) Détecter ses voisins : mise à jour des individus présent dans chaque zone de perception
- (3) Prendre une direction : calcul de la nouvelle direction, en fonction des voisins
- (4) Adapter sa vitesse : en fonction du statut digestif et de l'éloignement au groupe pour les grégaires
- (5) Se déplacer : avance dans la direction calculée, en fonction de la vitesse et de la végétation

Calibration

- Présentation du modèle et des agents
- Calibration (sélection des jeux de paramètres pour l'exploration)
- Exploration (mise en place et résultats)
- Conclusion et perspectives

Calibration - Principe

But : chercher les valeurs de paramètres permettant de rendre le modèle structurellement réaliste

Calibration - Principe

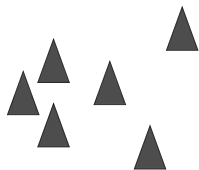
Pattern-Oriented Modelling : chercher à reproduire plusieurs patrons observés dans la nature

Ici : patrons de déplacements des bandes larvaires, sur sol homogène (nu ou végétalisé)

(Grimm et al., 1996, Railsback et Grimm, 2019)

Calibration - Critères d'évaluation

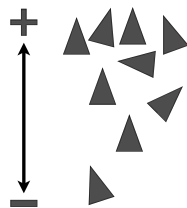
Sol nu :



(a) Polarisation
(Forte)



(b) Cohésion
(Forte)



(c) Gradient de densité
(Front plus dense)

Calibration - Critères d'évaluation

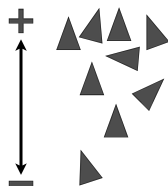
Sol végétalisé :



(a) Polarisation
(Forte)



(b) Cohésion
(Forte)



(c) Gradient de densité
(Front plus dense)



(d) Shape-ratio
(Banane)



(e) Indice de Gini
(Faible)

Calibration - Déroulé et calcul du Score Global

- 8 paramètres testés : rayon de chacune des zones de perception, poids de chacun des vecteurs force, angle de la zone aveugle et temps de digestion)

Calibration - Déroulé et calcul du Score Global

- 8 paramètres testés : rayon de chacune des zones de perception, poids de chacun des vecteurs force, angle de la zone aveugle et temps de digestion)
- 5832 jeux de paramètres testés

Calibration - Déroulé et calcul du Score Global

- 8 paramètres testés : rayon de chacune des zones de perception, poids de chacun des vecteurs force, angle de la zone aveugle et temps de digestion)
- 5832 jeux de paramètres testés
- 10 répétitions par jeu de paramètre testé, sur sol nu et sur sol végétalisé (116 640 simulations au total)

Calibration - Déroulé et calcul du Score Global

- 8 paramètres testés : rayon de chacune des zones de perception, poids de chacun des vecteurs force, angle de la zone aveugle et temps de digestion)
- 5832 jeux de paramètres testés
- 10 répétitions par jeu de paramètre testé, sur sol nu et sur sol végétalisé (116 640 simulations au total)
- Calcul du nombre de répétitions vérifiant chacun des critères (score sur 10)

Calibration - Déroulé et calcul du Score Global

- 8 paramètres testés : rayon de chacune des zones de perception, poids de chacun des vecteurs force, angle de la zone aveugle et temps de digestion)
- 5832 jeux de paramètres testés
- 10 répétitions par jeu de paramètre testé, sur sol nu et sur sol végétalisé (116 640 simulations au total)
- Calcul du nombre de répétitions vérifiant chacun des critères (score sur 10)
- Score global = moyenne des scores obtenus sur sol nu et sur sol végétalisé

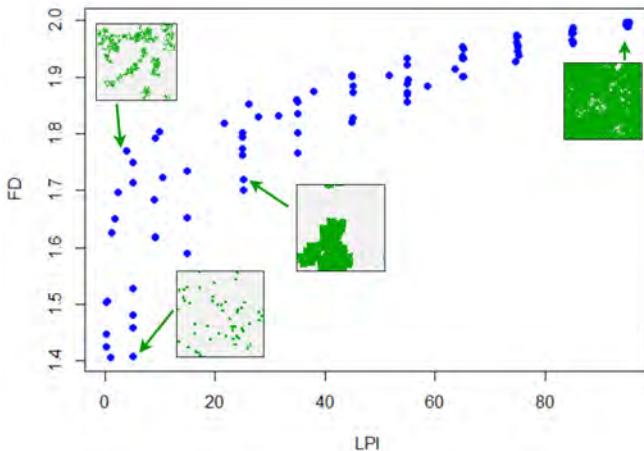
Calibration - Résultats

Sélection de 15 jeux de paramètres pour l'exploration avec Score global $\geq 90\%$

Exploration

- Présentation du modèle et des agents
- Calibration (sélection des jeux de paramètres pour l'exploration)
- Exploration (mise en place et résultats)
- Conclusion et perspectives

Exploration - génération de paysages



FD = Dimension Fractale (niveau de complexité)

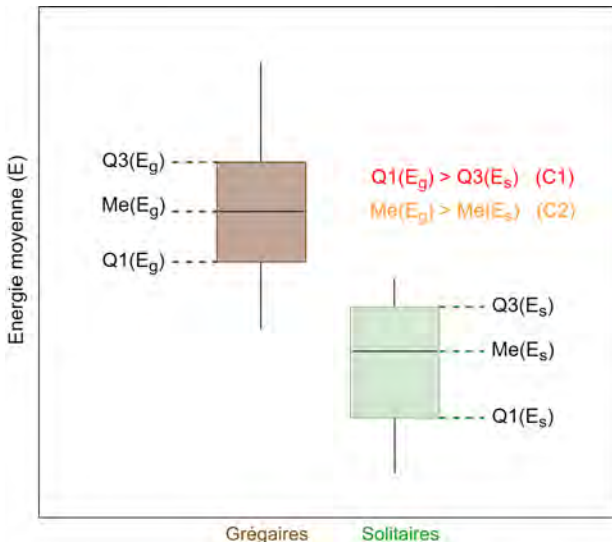
LPI = Largest Patch Index (proportion occupée par le plus grand cluster)

Exploration - Déroulé

- 90 paysages, avec une couverture végétale allant de 5% à 95%, avec différentes valeurs de FD et LPI
- 15 jeux de paramètres, sélectionnés lors de la calibration
- 50 répétitions par simulation

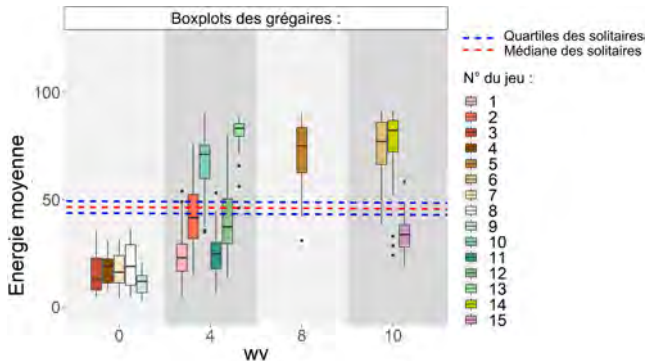
1 simulation = 1 seule phase (grégaire ou solitaire), pendant 1000 pas de temps, sur un des 90 paysages, pour un des 15 jeux de paramètres individuels sélectionnés (135 000 simulations en tout)

Exploration - Critères de comparaison grégaires / solitaires



Résultats - Valeurs de paramètres importants pour les grégaires

Sur les 15 jeux, seuls 5 permettent aux grégaires de surpasser les solitaires sur certains paysages selon C1

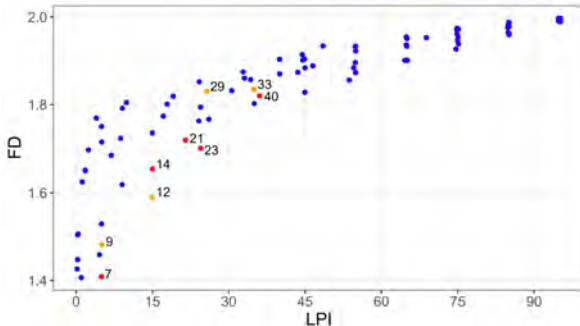


Jeux permettant un fort alignement et attraction à la végétation (wv) non nulle

Résultats

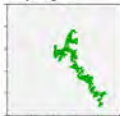
5 paysages avantageant les grégaires selon le critère C1

4 paysages selon le critère C2



- Couv. végétale <45%
- Ressource agrégée (1 seul cluster de végétation)

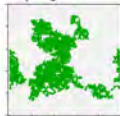
Paysage 7



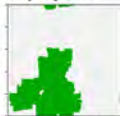
Paysage 14



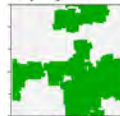
Paysage 21



Paysage 23



Paysage 40



Conclusion et perspectives

- Présentation du modèle et des agents
- Calibration (sélection des jeux de paramètres pour l'exploration)
- Exploration (mise en place et résultats)
- Conclusion et perspectives

Conclusion

- Les larves grégaires sont favorisées dans des environnements à forte variabilité spatiale où la ressource est agrégée et en quantité faible à modérée

(¹Ellis et Ashall, 1957 ; Collett et al. 1998 ; Despland et Simpson, 2009)

Conclusion

- Les larves grégaires sont favorisées dans des environnements à forte variabilité spatiale où la ressource est agrégée et en quantité faible à modérée
- Ce type de paysage favorise également la grégarisation par l'augmentation de la densité locale¹

(¹Ellis et Ashall, 1957 ; Collett et al. 1998 ; Despland et Simpson, 2009)

Conclusion

- Les larves grégaires sont favorisées dans des environnements à forte variabilité spatiale où la ressource est agrégée et en quantité faible à modérée
- Ce type de paysage favorise également la grégarisation par l'augmentation de la densité locale¹
- Un fort alignement des individus grégaires favorise à la fois les individus (meilleure partage) et le groupe (meilleure détection de la ressource)

(¹Ellis et Ashall, 1957 ; Collett et al. 1998 ; Despland et Simpson, 2009)

Perspectives

- Travaux futurs : prise en compte des aspects nutritifs de la végétation

(¹Bazazi et al. 2011, ²Lihoreau et al., 2017)

Perspectives

- Travaux futurs : prise en compte des aspects nutritifs de la végétation
- Des travaux de laboratoire de montrent que l'état nutritionnel des nymphes peut impacter leurs déplacements¹

(¹Bazazi et al. 2011, ²Lihoreau et al., 2017)

Perspectives

- Travaux futurs : prise en compte des aspects nutritifs de la végétation
- Des travaux de laboratoire de montrent que l'état nutritionnel des nymphes peut impacter leurs déplacements¹
- La prise en compte des besoins nutritionnels d'un individu et la distribution de ces nutriments dans l'espace peut impacter la recherche de nourriture²

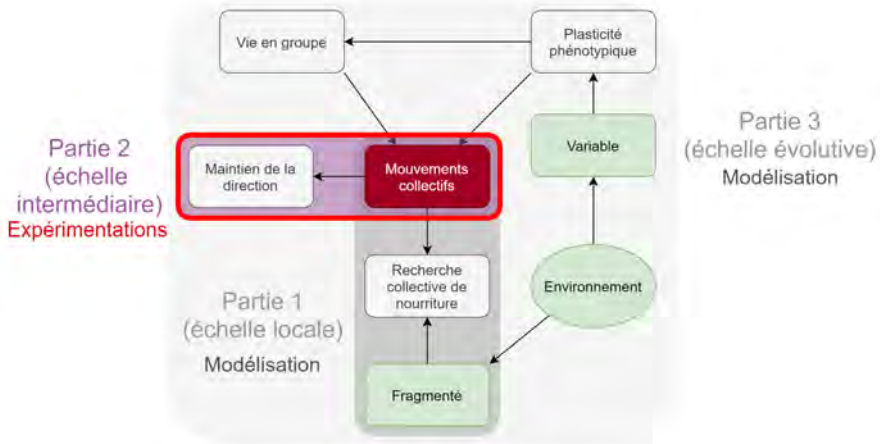
(¹Bazazi et al. 2011, ²Lihoreau et al., 2017)

Perspectives

- Travaux futurs : prise en compte des aspects nutritifs de la végétation
- Des travaux de laboratoire de montrent que l'état nutritionnel des nymphes peut impacter leurs déplacements¹
- La prise en compte des besoins nutritionnels d'un individu et la distribution de ces nutriments dans l'espace peut impacter la recherche de nourriture²
- Considérer des cellules possédant des quantité de ressources différentes serait également intéressant à considérer

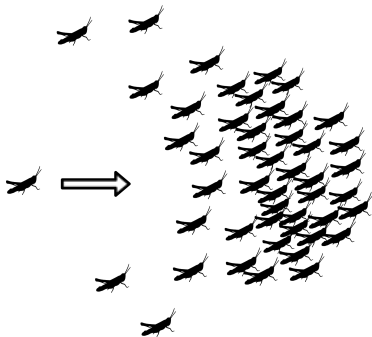
(¹Bazazi et al. 2011, ²Lihoreau et al., 2017)

Partie 2 - Maintien de la direction



Hypothèse

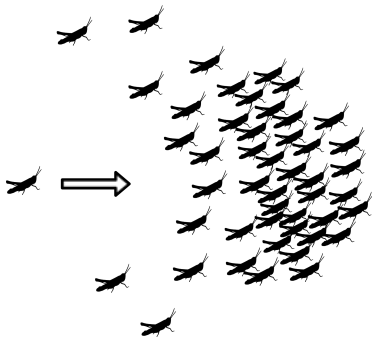
Capacité à retrouver le groupe après séparation, même hors de perception visuelle.



(Ellis et Ashall, 1957 ; Piou et al., 2022)

Hypothèse

Capacité à retrouver le groupe après séparation, même hors de perception visuelle.



⇒ Est-ce que les fèces jouent un rôle dans le maintien des bandes larvaires par un effet attractif ?

⇒ Plus ou moins marqué selon l'âge des fèces ?

(Ellis et Ashall, 1957 ; Piou et al., 2022)

Etat de l'art

- Les extraits de fèces de larves grégaires attirent les larves **solitaires**

(Fuzeau-Braesch et al. 1988, Obeng-Ofori et al. 1994, Heifetz et al. 1996)

Etat de l'art

- Les extraits de fèces de larves grégaires attirent les larves **solitaires**
- Les fèces ont un effet **agrégatif** sur des groupes de larves

(Fuzeau-Braesch et al. 1988, Obeng-Ofori et al. 1994, Heifetz et al. 1996)

Etat de l'art

- Les extraits de fèces de larves grégaires attirent les larves **solitaires**
- Les fèces ont un effet **agrégatif** sur des groupes de larves
- Le guaiacol et le phénol présents dans les fèces ont un effet **agrégatif**

(Fuzeau-Braesch et al. 1988, Obeng-Ofori et al. 1994, Heifetz et al. 1996)

Etat de l'art

- Les extraits de fèces de larves grégaires attirent les larves **solitaires**
- Les fèces ont un effet **agrégatif** sur des groupes de larves
- Le guaiacol et le phénol présents dans les fèces ont un effet **agrégatif**

Pas de tests individuels menés sur des larves grégaires
Pas de prise en compte de l'âge des fèces dans les études

(Fuzeau-Braesch et al. 1988, Obeng-Ofori et al. 1994, Heifetz et al. 1996)

Objectifs de l'étude

Test sur des larves L3 de *Schistocerca gregaria*

Objectifs de l'étude

Test sur des larves L3 de *Schistocerca gregaria*



(1) tests olfactométriques individuels de locustes exposés à des odeurs de fèces d'1h, de 24h, et de 1h et 24h simultanément

Objectifs de l'étude

Test sur des larves L3 de *Schistocerca gregaria*



(1) tests olfactométriques individuels de locustes exposés à des odeurs de fèces d'1h, de 24h, et de 1h et 24h simultanément

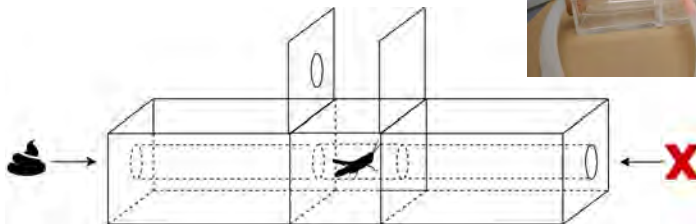
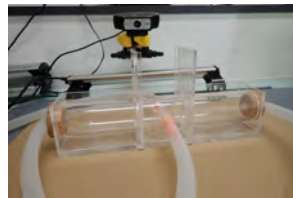
(2) détection et identification des composés organiques volatils (COVs) présents dans les fèces de différentes classes d'âges (1h, 4h et 24h)



Tests comportementaux - Matériel et méthodes

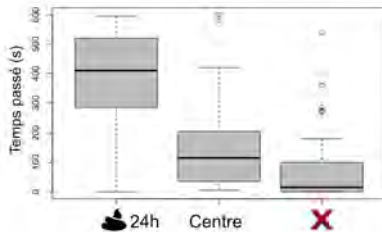
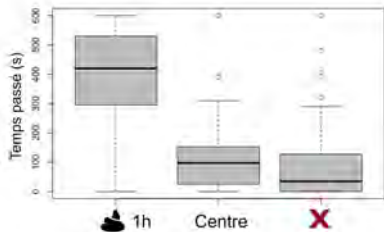


3 type de tests (fèces de 1h, 24h et 1h vs. 24h)
33 individus pour chaque type de test
10 min de test, puis observation du premier côté
choisi et de la durée passée de chaque côté de
l'arène



Tests comportementaux - Résultats

Temps passé par les individus de chaque côté de l'arène :
fèces d'1h (à gauche) et de 24h (à droite)



Résultats statistiquement significatifs (Wilcoxon, P-value < 0.05)

Tests comportementaux - Résultats

- ✓ Temps passé plus long du côté des fèces (1h et 24h)

Tests comportementaux - Résultats

- ✓ Temps passé plus long du côté des fèces (1h et 24h)
- ✓ Le côté des fèces est majoritairement choisi en premier (75% des individus testés)

Tests comportementaux - Résultats

- ✓ Temps passé plus long du côté des fèces (1h et 24h)
- ✓ Le côté des fèces est majoritairement choisi en premier (75% des individus testés)
- ✗ Pas de préférence observée entre les fèces d'1h et de 24h

Tests comportementaux - Résultats

- ✓ Temps passé plus long du côté des fèces (1h et 24h)
- ✓ Le côté des fèces est majoritairement choisi en premier (75% des individus testés)
- ✗ Pas de préférence observée entre les fèces d'1h et de 24h

Quels composés organiques volatils (COVs) peuvent être impliqués dans l'attraction ?

Analyses chimiques



Détection et identification des COVs présents dans les fèces de 1h et 24h par Chromatographie en phase gazeuse coupée à de la spectrométrie de masse (GC-MS)

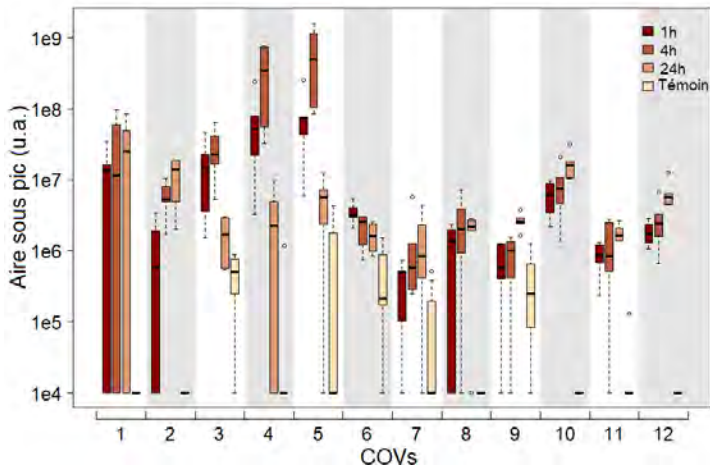
6 réplicats par classe de fèces testés (1h, 4h et 24h)
+ 7 échantillons témoins pour contrôler les odeurs provenant du laboratoire



Analyses effectuées à la plateforme PACE

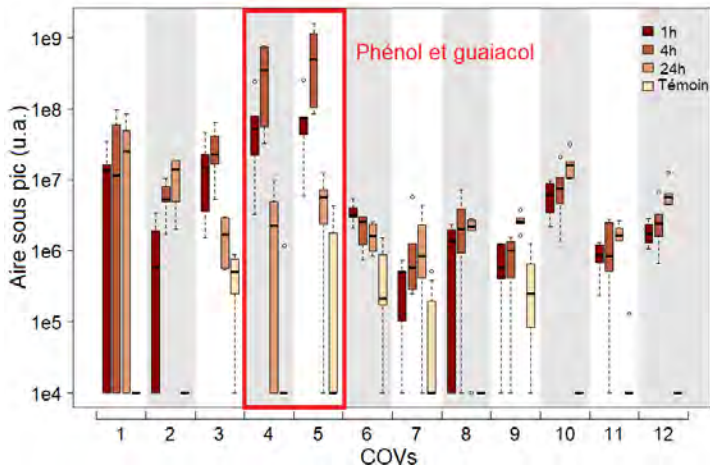
Analyses chimiques - Résultats

12 COVs détectés (11 identifiés) dans les fèces 1h et 24h, et peu ou pas présent dans les échantillons témoins



Analyses chimiques - Résultats

12 COVs détectés (11 identifiés) dans les fèces 1h et 24h, et peu ou pas présent dans les échantillons témoins



Conclusion et perspectives de recherches

Effet attractif des fèces, pas de préférence entre 1h et 24h, 12
COVs détectés

Conclusion et perspectives de recherches

Effet attractif des fèces, pas de préférence entre 1h et 24h, 12 COVs détectés

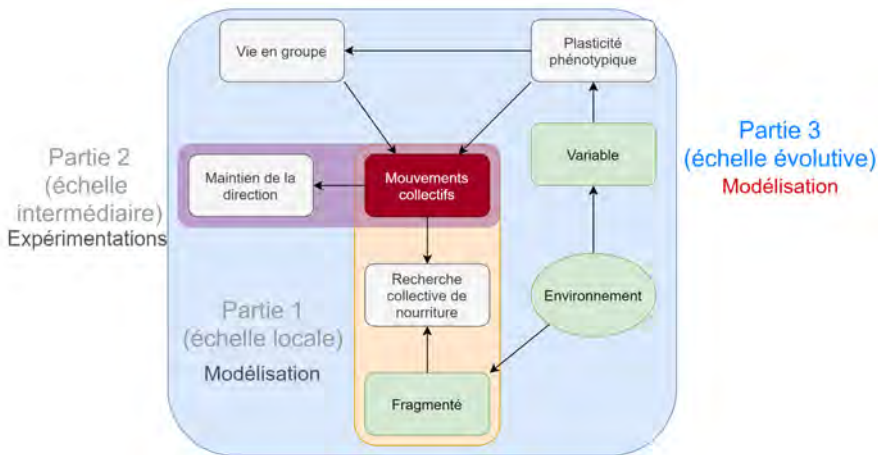
- Tests en laboratoire : déterminer les COVs responsables de cette attraction

Conclusion et perspectives de recherches

Effet attractif des fèces, pas de préférence entre 1h et 24h, 12 COVs détectés

- Tests en laboratoire : déterminer les COVs responsables de cette attraction
- Tests sur le terrain : attraction suffisante pour déterminer l'orientation d'individus retardataires ? Jusqu'à quelle distance ?

Conclusion générale et perspectives de recherche



Conclusion générale et perspectives de recherche

- La structuration du paysage et les caractéristiques individuelles pour le déplacement ont un impact sur la recherche de nourriture des larves de locustes (échelle spatiale locale)

Conclusion générale et perspectives de recherche

- La structuration du paysage et les caractéristiques individuelles pour le déplacement ont un impact sur la recherche de nourriture des larves de locustes (échelle spatiale locale)
- Les locustes vivent dans des environnements où la distribution de la végétation est très variable dans le temps et dans l'espace

Conclusion générale et perspectives de recherche

- La structuration du paysage et les caractéristiques individuelles pour le déplacement ont un impact sur la recherche de nourriture des larves de locustes (échelle spatiale locale)
- Les locustes vivent dans des environnements où la distribution de la végétation est très variable dans le temps et dans l'espace
- Y a-t-il un lien entre structuration du paysage et émergence du polyphénisme de phase ? (échelle évolutive)

Conclusion générale et perspectives de recherche

- La structuration du paysage et les caractéristiques individuelles pour le déplacement ont un impact sur la recherche de nourriture des larves de locustes (échelle spatiale locale)
- Les locustes vivent dans des environnements où la distribution de la végétation est très variable dans le temps et dans l'espace
- Y a-t-il un lien entre structuration du paysage et émergence du polyphénisme de phase ? (échelle évolutive)
- Proposition : implémentation d'un ABM démogénétique pour explorer l'évolution d'un trait associé au seuil de grégarisation des locustes (trait individuel de perception des voisins)

Conclusion générale et perspectives de recherche

- Difficulté : représenter des processus se déroulant à des échelles locales et à des échelles évolutives

Conclusion générale et perspectives de recherche

- Difficulté : représenter des processus se déroulant à des échelles locales et à des échelles évolutives
- ⇒ Développer un ABM multi-niveaux : un sous-modèle d'interaction locales (modèle Partie 1) et un sous-modèle démographique évolutif

Conclusion générale et perspectives de recherche

- Difficulté : représenter des processus se déroulant à des échelles locales et à des échelles évolutives
 - ⇒ Développer un ABM multi-niveaux : un sous-modèle d'interaction locales (modèle Partie 1) et un sous-modèle démographique évolutif
- Permettrait de vérifier si l'évolution du polyphénisme de phase résulte d'interactions à des échelles spatiales et temporelles variables

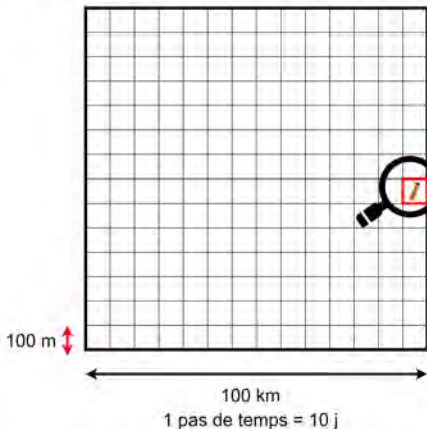
Conclusion générale et perspectives de recherche

- Difficulté : représenter des processus se déroulant à des échelles locales et à des échelles évolutives
 - ⇒ Développer un ABM multi-niveaux : un sous-modèle d'interaction locales (modèle Partie 1) et un sous-modèle démographique évolutif
- Permettrait de vérifier si l'évolution du polyphénisme de phase résulte d'interactions à des échelles spatiales et temporelles variables
- Attraction aux fèces pourrait avoir des implications dans le modèle

Proposition d'architecture pour le modèle multi-niveaux

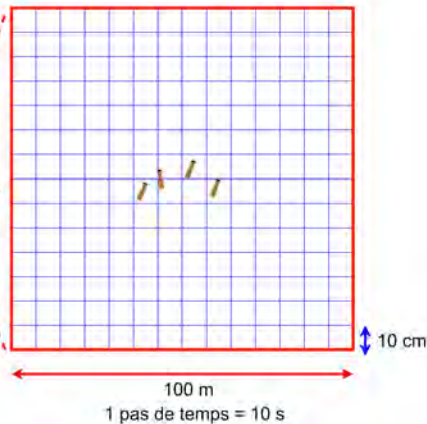
Sous-modèle Démogénétique :

dynamique des populations, transmission et évolution du trait individuel de perception des voisins



Sous-modèle d'interactions locales :

recherche collective de nourriture et interactions inter-individuelles (modèle de la Partie 1)



Remerciements

Merci aux membres du jury : E. Vercken, M. Lihoreau, P. Tixier



Merci à mes encadrants :
C. Piou, M-P. Chapuis, J-P. Rossi

Merci pour votre participation
sur les manipes :
N. Leménager, N. Barthes,
J. Huguenin, J. Foucaud,
L. Benoît, A. Bordes



Et merci à vous tous pour
votre présence !