

FICHE DE RECUEIL DES FAITS MARQUANTS DES DEPARTEMENTS/CENTRES/METAPROGRAMMES

(Renseigner une fiche par fait marquant, classification des rubriques en annexe)

Année concernée : 2018

Fiche envoyée par : MalAGE / Département MIA / Centre Jouy-en-Josas

Priorité attribuée au FM (à renseigner par le CD/PC/Directeur de MP) :

Titre du fait marquant : Modélisation de dynamiques démographiques et épidémiologiques sur un graphe de grande taille

Catégorie: Publications

Montagnon P. Stability of Piecewise Deterministic Markovian Load Processes on Networks.

<https://arxiv.org/abs/1704.05644>

Montagnon P. A stochastic SIR model on a graph with epidemiological and population dynamics occurring over the same time scale. <https://arxiv.org/abs/1805.05034>

Contact : Pierre Montagnon, pierre.montagnon@inra.fr; Elisabeta Vergu, elisabeta.vergu@inra.fr

Unité : MalAGE

Département : MIA

Centre INRA de Recherche : Jouy-en-Josas

Méta-programme (si adapté):

Priorité principale du Document d'Orientation:

#OpenScience-3 : Des approches prédictives en biologie

Priorité complémentaire du Document d'Orientation (pas plus d'une) :

#3Perf-2 : D'autres leviers biologiques et technologiques pour la multi-performance

Plan d'action (si adapté) :

Prospective scientifique interdisciplinaire : Approches prédictives en biologie et en écologie

Mots-clés (rubrique libre) : métapopulations, processus stochastiques sur graphe, modèles épidémiques, probabilité d'un événement épidémique majeur, taille finale d'épidémie

Résumé (10 lignes) :

Nous proposons une modélisation probabiliste des dynamiques de populations ainsi que de la transmission de maladies infectieuses dans et entre les exploitations bovines et les opérateurs commerciaux en France, au gré des échanges d'animaux, qui représentent une des voies majeures de diffusion d'épidémies. Un premier modèle de population est considéré, dans lequel les dynamiques démographiques (importations, naissances et morts) au sein des exploitations sont contrôlées. On établit des résultats de stabilité en temps long pour ce modèle. Dans un deuxième modèle, on y superpose des dynamiques épidémiologiques. On parvient alors à estimer la probabilité pour qu'une maladie infectieuse introduite en un point donné du réseau d'échanges occasionne un événement épidémique

majeur, et on évalue le nombre total d'animaux infectés dans ce dernier cas. Outre des résultats mathématiques originaux, ces travaux apportent des éléments pour une meilleure compréhension de la propagation de maladies infectieuses animales à large échelle et pour une maîtrise optimisée et ciblée.

Contexte et enjeux : Les mouvements d'animaux dus au commerce sont un vecteur important de la propagation d'épidémies entre des exploitations bovines sur de grandes échelles spatiales. La quantité importante de données collectées par les autorités européennes au cours des deux dernières décennies permet de connaître la position au cours du temps de chaque animal au sein des territoires nationaux, ce qui permet de définir et de calibrer des modèles prédictifs pour la propagation de pathogènes, d'identifier les points vulnérables du réseau et de mettre en place des stratégies de contrôle visant à prévenir et endiguer les épidémies (exemple Fig. 1).

Mathématiquement, il s'agit de fournir des approximations de processus épidémiologiques généralisant à des graphes des résultats connus dans le cas uni-dimensionnel, et d'estimer des quantités pertinentes associées aux modèles épidémiologiques considérés (probabilité d'un événement épidémiologique majeur et taille totale de l'épidémie).

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet ANR Cadence, portant sur la propagation de processus épidémiques sur des réseaux dynamiques de mouvements d'animaux avec application aux bovins en France, coordonné par l'équipe Dynenvie, et s'appuient sur une collaboration entre l'unité MaIAGE et le laboratoire CMAP de l'Ecole Polytechnique.

Résultats : Des conditions suffisantes de stabilité pour un modèle markovien de métapopulations sont établies. On fournit également une méthode de calcul numérique de la probabilité d'un événement épidémique majeur, pour une introduction de l'agent pathogène dans un nœud donné du réseau d'échanges. Des valeurs approchées de cette probabilité sont ensuite calculées dans le cas du réseau réel d'échanges de bovins dans le Finistère en 2015 (Fig. 2). On obtient enfin une borne inférieure pour le temps d'extinction et la taille totale d'une épidémie dans le cas d'un événement épidémique majeur.

Perspectives : Dans la suite de ces travaux, nous envisageons de simuler et calibrer une version légèrement modifiée du modèle sur les données disponibles, pour en tirer des prédictions et identifier les vulnérabilités du graphe. Parallèlement à cette problématique, nous souhaitons calculer la distribution quasi-stationnaire du processus épidémique en adaptant des méthodes spectrales ou trajectorielles existantes.

Outre des résultats mathématiques originaux, ces travaux apportent des éléments pour une meilleure compréhension de la propagation de maladies infectieuses animales à large échelle et pour une maîtrise optimisée et ciblée.

Valorisation : Deux articles (en deuxième lecture après révision) à *Stochastic Processes and Their Applications* et *Journal of Mathematical Biology*, respectivement. Thèse de doctorat P. Montagnon (co-encadrement E. Vergu, INRA MaIAGE & V. Bansaye, Ecole Polytechnique CMAP).

Références bibliographiques :

- E. Pardoux and B. Samegni-Kepgnou (2017). Large deviation principle for epidemic models, *Journal of Applied Probability*, 54(3):905–920.
- B.L. Dutta, P. Ezanno, and E. Vergu (2014). Characteristics of the spatio-temporal network of cattle movements in France over a 5-year period. *Preventive Veterinary Medicine*(1):79-94.
- D. Down, S. P. Meyn, R. L. Tweedie (1995). Exponential and Uniform Ergodicity of Markov Processes, *The Annals of Probability* 23 (1995) 1671–1691.

Illustrations (au format jpg, avec légende, auteur de la photo, et copyright s'il y en a un)

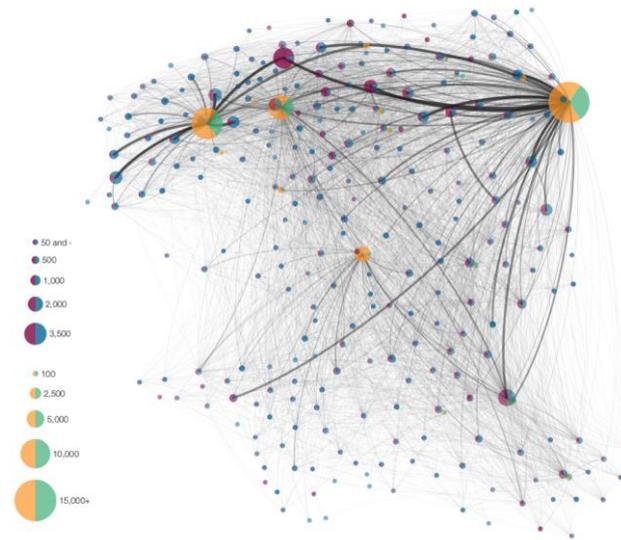


Fig 1. Localisation géographique des exploitations échangeant des animaux dans le Finistère en 2015, agrégées au niveau communal. La taille d'un nœud représente sa population moyenne sur l'année. Les couleurs des nœuds représentent la part des flux entrants (en orange pour les opérateurs et en rouge pour les fermes) et sortants (en vert pour les opérateurs et en bleu pour les fermes). Les arêtes représentent l'existence de mouvements d'animaux entre deux exploitations dans la base de données, avec une épaisseur reflétant le volume d'échanges observé. *Crédit : Gaël Beaunée, INRA-Oniris, BIOEPAR, Nantes.*

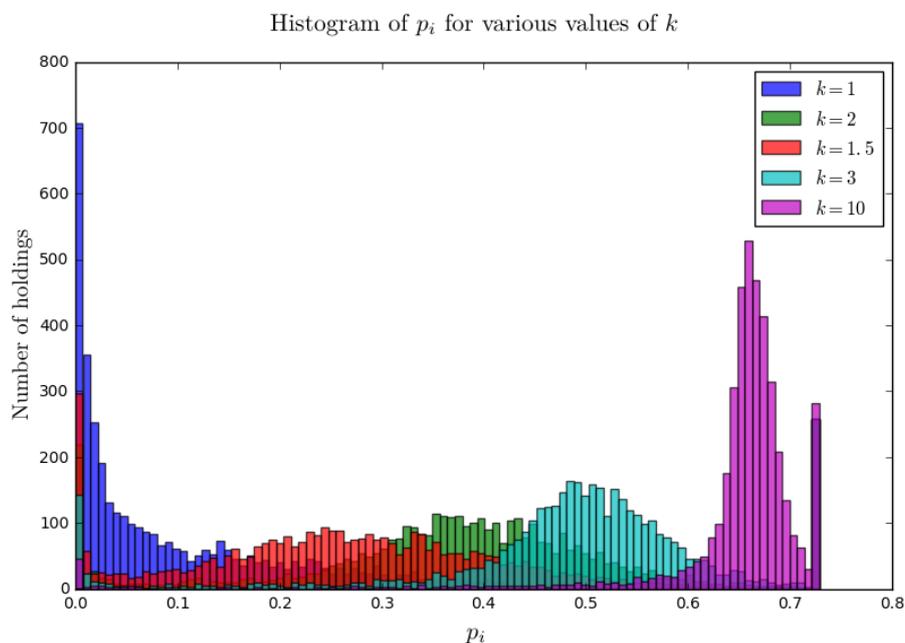


Fig 2. Histogramme (sur 4183 nœuds – la totalité des fermes et opérateurs commerciaux de bovins du Finistère) des probabilités d'occurrence p_i d'un événement épidémique majeur au départ des différents nœuds i du graphe représenté dans la Fig. 1. Un modèle épidémique SIR (Susceptibles – Infectés – Remis) est considéré. Les paramètres démographiques sont calibrés sur les données réelles des exploitations de bovins du Finistère et les paramètres épidémiologiques correspondent à la fièvre aphteuse, accélérés d'un facteur k .

CLASSIFICATION

Priorités du Document d'Orientation (voir <http://2025.inra.fr/>)

[#Global] L'ambition globale d'atteindre la sécurité alimentaire dans un contexte de transitions

- **#Global-1** : Des transitions globales assumées
- **#Global-2** : La disponibilité des bio-ressources gérée aux différentes échelles
- **#Global-3** : Une vision intégrée des comportements, des marchés et des échanges
- **#Global-4** : Des approches territorialisées au service d'une compréhension générique des performances des systèmes alimentaires

[#3Perf] Des agricultures diverses et multi-performantes

- **#3Perf-1** : L'agro-écologie mobilisée au service de la multi-performance des agricultures
- **#3Perf-2** : D'autres leviers biologiques et technologiques pour la multi-performance
- **#3Perf-3** : L'évaluation multicritère pour objectiver les performances
- **#3Perf-4** : Des transitions comprises et facilitées

[#Climat] Les systèmes agricoles et forestiers face au défi climatique

- **#Climat-1** : L'adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique
- **#Climat-2** : La maîtrise de la contribution de l'agriculture et de la forêt à l'effet de serre
- **#Climat-3** : La conservation de la biodiversité et la valorisation des services
- **#Climat-4** : La préservation et la valorisation des ressources en eau et en sol

[#Food] Une alimentation saine et durable

- **#Food-1** : De nouveaux systèmes alimentaires territorialisés, notamment urbains
- **#Food-2** : Les systèmes alimentaires alliés de la santé
- **#Food-3** : Les qualités des aliments élaborées dès l'amont

[#BioRes] Des bio-ressources aux usages complémentaires

- **#BioRes-1** : Le développement des biotechnologies vertes et blanches
- **#BioRes-2** : L'apport des biotechnologies et des procédés pour de nouvelles ressources adaptées aux usages
- **#BioRes-3** : La conception de systèmes bioéconomiques

[#OpenScience] Une science ouverte grâce au numérique

- **#OpenScience-1** : Des infrastructures de recherche connectées
- **#OpenScience-2** : Une organisation des données pour le partage et la réutilisation
- **#OpenScience-3** : Des approches prédictives en biologie
- **#OpenScience-4** : De nouveaux modes de diffusion de la connaissance
- **#OpenScience-5** : Le métier et l'environnement du chercheur adaptés au numérique

[#OpenInra] Un acteur national de l'innovation ouvert dans les territoires

- **#OpenInra-1** : Une ouverture vers l'enseignement supérieur et un partenariat territorial renforcés
- **#OpenInra-2** : La mobilisation de toute l'expertise de l'Inra en appui aux politiques publiques
- **#OpenInra-3** : Le chemin vers l'innovation bénéficie d'un pilotage renforcé
- **#OpenInra-4** : La Science ouverte aux acteurs non-marchands de la société

[#Appui] Anticiper et accompagner les évolutions

- **#Appui-1** : Une organisation efficace, agile, résiliente
- **#Appui-2** : Une stratégie de financement fiable et solidaire
- **#Appui-3** : Un Institut attractif et motivant pour ses agents
- **#Appui-4** : Les actions et les valeurs de l'Institut visibles et partagées par une communication externe et interne active
- **#Appui-5** : Un pilotage institutionnel efficace et partagé

Plans d'action

- **Ressources humaines et communication interne** : pour assurer l'attractivité et la cohésion d'une communauté de travail chargée d'une mission majeure de service public, en veillant à la motivation et à la qualité de vie au travail des agents titulaires, contractuels ou partenaires
- **Coopération avec l'enseignement supérieur** : pour décliner les thématiques prioritaires de l'Inra en stratégies scientifiques de sites, partagées avec nos partenaires dans les territoires, contribuant à faire de chaque grand site universitaire un pôle de rayonnement international sur les thématiques d'excellence de l'Inra
- **Innovation** : pour valoriser et élargir le formidable potentiel d'innovation de l'Institut, en combinant les disciplines, en co-construisant avec les acteurs des filières et des territoires, en valorisant nos infrastructures et en ciblant des domaines d'innovation prioritaires
- **Stratégie européenne et internationale** : pour décliner la stratégie scientifique de l'Inra avec un plan d'action visant à mobiliser nos principaux partenaires sur nos priorités au sein d'un réseau mondial de la recherche agronomique et alimentaire, et à assurer notre présence dans les institutions internationales
- **Prospective scientifique interdisciplinaire** : pour éclairer les futurs fronts de science, enrichir nos orientations, développer des actions incitatives, favoriser des partenariats scientifiques, économiques, disciplinaires ou de formation
 - ✓ Sciences pour les élevages de demain
 - ✓ Intégration des recherches (nexus) santé-alimentation-élevage
 - ✓ Agro-écologie
 - ✓ Approches prédictives en biologie et en écologie

Méta-programmes

- SMACH
- M2E-MEM
- GISA
- SELGEN
- DID'IT
- ACCAF
- EcoServ
- Glofoods