

Calcul de populations humaines à risque de contracter la rage du raton laveur dans le sud du Québec pour une étude coûts-bénéfice

Antoinette Ludwig, DMV, PhD
Philippe Berthiaume, PhD
Stéphanie Brazeau, MSc
Michel Bigras-Poulin, DMV, PhD
et
Denise Bélanger, DMV, PhD

Groupe de recherche en épidémiologie des zoonoses et santé publique
(GREZOSP), Université de Montréal

mai 2009

Référence à citer :

Antoinette Ludwig, Philippe Berthiaume, Stéphanie Brazeau, Michel Bigras-Poulin, Denise Bélanger, 2009, Calcul de populations humaines à risque de contracter la rage du raton laveur dans le sud du Québec pour une étude coûts-bénéfice. Rapport technique, Groupe de recherche en épidémiologie des zoonoses et santé publique, Université de Montréal, Saint Hyacinthe, 30p.

Table des matières

1	Résumé	6
2	Mise en contexte et objectif de l'étude.....	7
3	Méthodologie.....	7
3.1	Définition des simulations	7
3.2	Définition de la zone d'étude.....	7
3.3	Calage des paramètres du modèle pour les différents scénarios	9
3.3.1	Capacité de support cible :.....	9
3.3.2	Durée de simulation et nombre d'itérations.....	9
3.3.3	Moment et position du cas index	9
3.3.4	Mesures de contrôle :	10
3.4	Analyse des résultats.....	11
3.4.1	Analyse des itérations	11
3.4.2	Calcul d'une itération moyenne	11
3.4.3	Calcul de la population humaine à risque	12
4	Résultats	13
4.1	Scénario 1.....	13
4.1.1	Analyse des itérations	13
4.1.2	Sélection d'une itération moyenne	16
4.1.3	Calcul des populations humaines à risque	17
4.2	Scénario2.....	18
4.2.1	Analyse des itérations	18
4.2.2	Sélection d'une itération moyenne	19
4.2.3	Calcul des populations humaines à risque	19
4.3	Scénario3.....	20
4.3.1	Analyse des itérations	20
4.3.2	Sélection d'une itération moyenne	23
4.3.3	Calcul des populations humaines à risque	24
5	Discussion.....	25
6	Références bibliographiques.....	28
7	Annexes	29
7.1	Annexe 1 : Valeurs ORM par défaut.....	29

Table des figures

<i>Figure 1 : Localisation de la zone d'étude</i>	8
<i>Figure 2 : Localisation du cas index (rage raton laveur) de 2006 dans notre zone d'étude et sélection de l'hexagone atteint dans le logiciel ORM</i>	10
<i>Figure 3 : Localisation géographique de la zone d'étude (région d'étude) et de la zone potentiellement à risque pour la population humaine (MRC en mauve).</i>	13
<i>Figure 4 : Dispersion de la rage selon le scénario 1 sans résurgence (type a) (itération 26). L'année 2017 n'est pas représentée car elle ne contient aucun cas.</i>	14
<i>Figure 5 : Dispersion de la rage selon le scénario 1 avec résurgence (type b) (itération 1)</i>	15
<i>Figure 6 : Courbe du nombre de cas de ratons rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2017 selon le Scénario 1 (dispersion de type a)</i>	16
<i>Figure 7 : Courbe du nombre de cas de ratons rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2017 selon le Scénario 1 (dispersion de type b)</i>	16
<i>Figure 8 : Résultats du nombre de cas annuels de ratons rabiques et nombre d'humains à risque pour le Scénario 1 de 2006 à 2017.</i>	17
<i>Figure 9 : Dispersion de la rage selon le scénario 2 (itération 6). Les polygones d'action de contrôle sont représentés sur les cartes en vert pour 2006, en bleu pour 2007 et en rouge pour 2008 à 2010 inclus.</i>	18
<i>Figure 10 : Courbe du nombre de cas de ratons rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2018 selon le Scénario 2.</i>	19
<i>Figure 11 : Résultats du nombre de cas annuels de ratons rabiques et nombre d'humains à risque pour le Scénario 2, entre 2006 et 2018.</i>	20
<i>Figure 12 : Dispersion de la rage selon le scénario 3 (itération 68) (type a). Les polygones d'action de contrôle sont représentés sur les cartes en vert pour 2006, en bleu pour 2007 et en rouge pour 2008 à 2018 incluse.</i>	21
<i>Figure 13 : Dispersion de la rage selon le scénario 3 (itération 16) (type b). Les polygones d'action de contrôle sont représentés sur les cartes en vert pour 2006, en bleu pour 2007 et en rouge pour 2008 à 2018 incluse.</i>	22
<i>Figure 14 : Courbe du nombre de cas de ratons rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2018 selon le Scénario 3 (type a).</i>	23
<i>Figure 15 : courbe du nombre de cas de ratons rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2018 selon le Scénario 3 (type b).</i>	23
<i>Figure 16 : Résultats du nombre de cas annuels de ratons rabiques et nombre d'êtres humains à risque pour la Scénario 3 de 2006 à 2018.</i>	24

1 Résumé

Ce rapport technique présente la méthodologie et les résultats principaux d'une étude de simulation de la propagation de la rage du raton laveur au Québec et de prédiction des populations humaines à risque. Cette étude a été effectuée dans le but de répondre à un besoin formulé par le comité scientifique sur la rage du raton laveur au Québec, soit la nécessité de quantifier les populations humaines à risque pour alimenter une étude coût-bénéfice du programme de contrôle de la rage du raton-laveur au Québec.

Conséquemment, l'objectif principal de cette étude était de définir les populations humaines à risque dans une zone d'étude située au sud de Montréal en fonction de trois différents scénarios potentiels de gestion des opérations de terrains, soient : (1) absence de mesure de contrôle, (2) vaccination durant 5 années dans une zone restreinte définie autour du cas index à l'intérieur de la zone d'étude et (3) vaccination durant l'ensemble de la période d'étude (12 ans) dans la même zone restreinte que pour le second scénario. L'évaluation de la population humaine à risque a été effectuée pour chacune des années précédant la sortie de l'épidémie de la zone d'étude. La simulation de ces scénarios a été effectuée à l'aide de l'Ontario Rabies Model (ORM), un logiciel de simulation fourni par le Ministère des Ressources naturelles de l'Ontario et utilisé avec autorisation du Ministère.

Les résultats de simulations obtenus suggèrent que le choix des opérations de terrain peut avoir un effet important sur la vitesse de propagation de l'épidémie. Ainsi, dans toutes les itérations de l'épidémie simulée selon le scénario (1) le front épidémique a progressé rapidement pour atteindre les limites de la zone d'étude en bordure de Montréal en quelques années seulement. Dans le cas du scénario (2), la progression de l'épidémie a été notablement ralentie par rapport au scénario (1) pendant les 5 années durant lesquelles une vaccination était effectuée mais a repris une progression rapide similaire à celle observée en absence de mesure de contrôle après l'arrêt de la vaccination. Finalement, dans le cas du scénario (3), une vaccination durant toute la période d'étude a provoqué un ralentissement considérable de la vague de progression de la rage mais l'épidémie est finalement sortie de la zone vaccinée pour redémarrer la progression en vague épidémique. Il est apparu clairement que la population à risque augmente de façon drastique lorsque l'épidémie atteint la rive sud du Saint-Laurent puisque, en raison de la définition des zones à risques, la métropole se trouve alors incluse dans le calcul des populations à risque. Les valeurs annuelles de population à risque sont présentées dans la section Résultats du rapport.

La définition des scénarios utilisés dans cette étude a en partie été inspirée des actions de contrôle effectuées au Québec mais il n'était pas question ici de tenter de reproduire exactement celles-ci. En effet, les opérations de terrains ont pu être adaptées aux situations locales spécifiques qui prévalaient au moment de l'évolution de l'épizootie, ce qui n'a pas été fait dans ce travail. Toutefois, il ne s'agit pas nécessairement d'un point faible important de l'étude puisque celle-ci visait à obtenir une évaluation de l'effet général de scénarios de gestion des opérations de terrains. Il est donc

important de garder à l'esprit lors de la lecture de ce rapport que ce projet de simulation ne constitue pas une tentative d'évaluation des opérations qui se sont déroulées au Québec de 2006 à 2008.

2 Mise en contexte et objectif de l'étude

Ce rapport technique présente la méthodologie, les résultats principaux d'une étude de simulation de la propagation de la rage du raton laveur au Québec et de prédiction des populations humaines à risque. Cette étude a été effectuée dans le but de répondre à un besoin formulé par le comité scientifique sur la rage au Québec, qui était la nécessité d'obtention de valeurs de populations à risque pour alimenter une étude coût-bénéfice du programme de contrôle de la rage du raton-laveur au Québec. L'objectif principal de cette étude était donc de définir les populations humaines à risque en fonction de trois différents scénarios de gestion des opérations de terrains

3 Méthodologie

Les simulations correspondant aux trois scénarios ont été effectuées à l'aide du progiciel Ontario Rabies Model (ORM) fourni par le Ministère des ressources naturelles de l'Ontario et utilisé avec leur accord (Tinline 2007; Tinline, Ball et al. 2009). ORM permet la simulation stochastique à une échelle individuelle et géographiquement distribuée d'une population de rats laveurs sur un territoire donné, à un pas de temps hebdomadaire. Les étapes impliquées ont consisté à définir une zone d'étude, effectuer le calage des paramètres de manière à définir des simulations correspondant à trois scénarios de gestion des opérations de terrain spécifiques, à réaliser un nombre élevé d'itérations pour chacun des trois scénarios définis, puis à analyser les résultats obtenus afin de calculer les populations humaines à risque pour chaque scénario.

3.1 Définition des simulations

Trois scénarios distincts de stratégie d'opérations de gestion de la rage ont été simulés. Ces trois scénarios sont les suivants :

- ❖ Scénario 1 : Simulation de l'expansion de la rage en absence de mesures de contrôle pour la période allant de 2006 à 2018;
- ❖ Scénario 2 : Simulation de l'expansion de la rage de 2006 à 2018 si des mesures de contrôle sont effectuées pour les années 2006 à 2010 puis abandonnées;
- ❖ Scénario 3 : Simulation de l'expansion de la rage de 2006 à 2018 si des mesures de contrôle sont effectuées pour les années 2006 à 2018.

3.2 Définition de la zone d'étude

La zone d'étude a été déterminée de manière à inclure la région du sud du Québec dans laquelle se situent les cas de rage depuis 2006 (Figure 1) ainsi que les zones géographiques où se sont déroulées les actions de contrôle entreprises entre 2006 et 2008. Ses dimensions ont également été choisies afin de contenir une niche écologique homogène pour les populations de rats.

Elle englobe les régions administratives de la Montérégie, de l'Estrie, du Centre du Québec et l'extrême ouest de Chaudière-Appalaches. Elle est limitée au sud par la frontière des États-Unis incluant les états frontaliers du Maine, du New-Hampshire, du Vermont et de New York et au Nord par le fleuve St-Laurent à partir de Cornwall jusqu'à l'ouest de la ville de Québec. Elle occupe 32 400 km². Le territoire de cette zone d'étude est partagé entre une zone plane à l'ouest à vocation agricole sauf dans la banlieue de Montréal et une région plus montagneuse à l'est partagée entre des vocations forestières et agricoles.

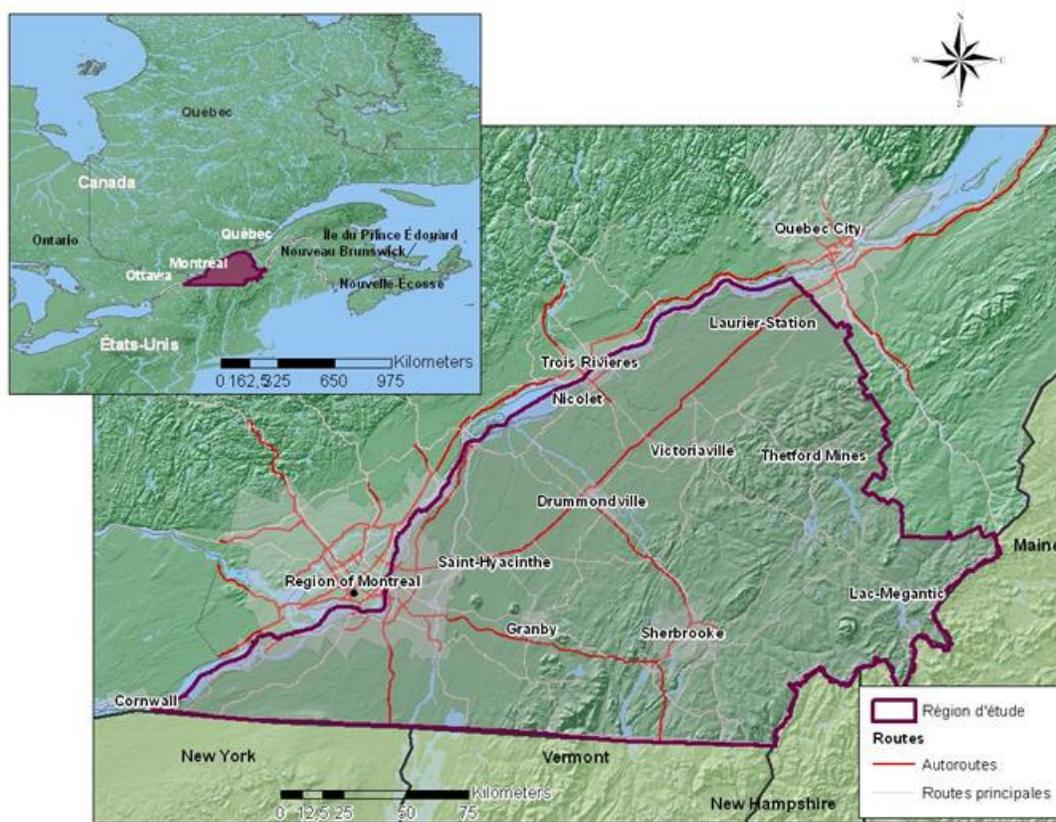


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

La modélisation a été effectuée pour une zone géographique d'étude définie à partir d'une grille de cellules hexagonales couvrant exclusivement l'ensemble de la zone d'étude choisie. Cette zone d'étude intégrée dans l'ORM acquiert des contours irréguliers du fait qu'elle est alors subdivisée en unité spatiale de simulation qui sont des cellules hexagonales de 2 km de rayon, soit 10.34 km² de superficie.

3.3 Calage des paramètres du modèle pour les différents scénarios

Le nombre de paramètres total dans l'outil ORM est élevé (Annexe p29) et dans cette étude seuls les paramètres définissant spécifiquement les scénarios ont été ajustés.

Les paramètres qui ont été calés spécifiquement pour cette étude sont:

- ❖ la capacité de support cible du milieu (K);
- ❖ les durées de simulations et le nombre d'itérations;
- ❖ la localisation et la date du cas index;
- ❖ l'étendue, la date et l'immunisation post-vaccination des stratégies de contrôle.

Les valeurs par défaut suggérées dans ORM ont été utilisées pour tous les autres paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle.

3.3.1 Capacité de support cible :

La capacité de support cible du milieu (K) correspond au nombre moyen visé d'animaux présents dans chaque cellule de la grille hexagonale à la trentième semaine de l'année. La valeur de ce paramètre a été fixé à 100 ratons par cellule soit environ 10 ratons / km². Cette valeur correspond avec la valeur moyenne de densités de raton mesurées dans le sud du Québec en 2007 (Daigle and Vandal 2007).

En raison de l'aspect dynamique et stochastique de l'ORM, le nombre exact de ratons par cellule variait dans le temps ainsi que d'une cellule à l'autre.

3.3.2 Durée de simulation et nombre d'itérations

Les durées des simulations ont été de 12 ans pour le scénario 1 (2006 à 2017) et de 13 ans pour les scénarios 2 et 3 (2006 à 2018).

En raison de contraintes logistiques le nombre exact d'itération a varié d'une simulation à l'autre : Scénario 1 : 93 itérations; scénario 2 : 59 itérations; scénario 3 : 70 itérations

Les simulations pour les 3 scénarios ont été débutées à partir d'une même population initiale créée selon la procédure définie dans le guide d'utilisation de ORM (Tinline 2007; Tinline, Ball et al. 2009).

3.3.3 Moment et position du cas index

L'introduction du cas index rabique représentant le premier cas de rage du raton chez un raton rencontré en 2006 a été effectuée de la façon suivante.

Les coordonnées géographiques du premier cas de 2006 ont permis de sélectionner la cellule hexagonale ORM de notre zone d'étude qui allait contenir le premier cas rabique (Figure 2). La date de ce premier cas nous a permis de déterminer la semaine à laquelle le cas devait apparaître dans nos simulations. Ainsi le premier cas rabique devait apparaître la 23ème semaine (date du 6 juin) dans la cellule comportant la coordonnée suivante : Lat = 45,1097N et Long = -72,8555W.

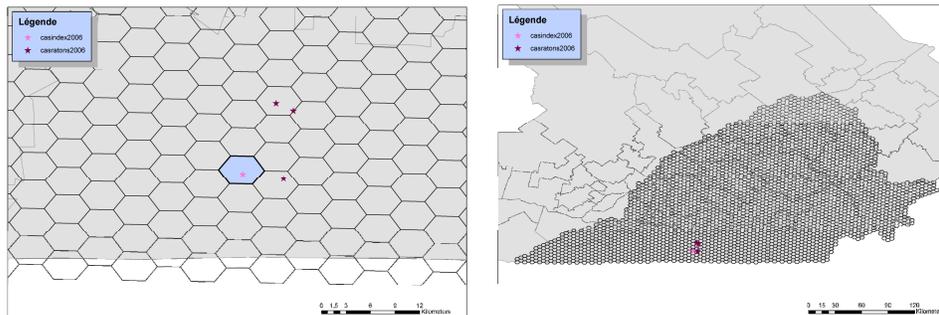


Figure 2 : Localisation du cas index (rage raton laveur) de 2006 dans notre zone d'étude et sélection de l'hexagone atteint dans le logiciel ORM

3.3.4 Mesures de contrôle :

❖ Scénario 1

Dans le cas du scénario 1 aucune mesure de contrôle n'a été programmée.

❖ Scénario 2

Les mesures de contrôle considérées pour l'année 2006 ont été les suivantes : les polygones des actions de contrôle (dépeuplement, vaccination par voie intramusculaire et vaccination par voie orale) ont été fusionnés en un seul polygone dans lequel un taux d'immunisation de 40% a été appliqué aux rats à la date de la mi-août (34ème semaine).

Les mesures de contrôle considérées pour l'année 2007 ont été les suivantes : les polygones des actions de contrôle (dépeuplement, vaccination par voie intramusculaire et vaccination par voie orale) ont été fusionnés en un seul polygone dans lequel un taux d'immunisation de 40% a été appliqué aux rats à la date de la mi-août (34ème semaine).

Les mesures de contrôle considérées pour l'année 2008 ont été les suivantes : les polygones des actions de contrôle (vaccination par voie orale) ont été fusionnés en un seul polygone dans lequel un taux d'immunisation de 50% a été appliqué aux individus à la date de la mi-août (34ème semaine).

Pour les années 2009 et 2010, la stratégie de contrôle appliquée en 2008 a été répétée.

À partir de 2011, plus aucune action de contrôle n'a été considérée.

Les taux d'immunisation ont été fixés d'après les résultats de l'évaluation de la couverture vaccinale chez les rats laveurs effectuée au Québec en 2007 (Bélanger, Séguin et al. 2008).

❖ Scénario 3

Les mesures de contrôle considérées pour l'année 2006 ont été les suivantes : les polygones des actions de contrôle (dépeuplement, vaccination par voie intramusculaire et vaccination par voie orale) ont été fusionnés en un seul polygone dans lequel un taux d'immunisation de 40% a été appliqué aux rats à la date de la mi-août (34^{ème} semaine).

Les mesures de contrôle considérées pour l'année 2007 ont été les suivantes : les polygones des actions de contrôle (dépeuplement, vaccination par voie intramusculaire et vaccination par voie orale) ont été fusionnés en un seul polygone dans lequel un taux d'immunisation de 40% a été appliqué aux rats à la date de la mi-août (34^{ème} semaine).

Les mesures de contrôle considérées pour l'année 2008 ont été les suivantes : les polygones des actions de contrôle (vaccination par voie orale) ont été fusionnés en un seul polygone dans lequel un taux d'immunisation de 50% a été appliqué aux individus à la date de la mi-août (34^{ème} semaine).

Pour les années 2009 et 2018, la stratégie de contrôle appliquée en 2008 a été répétée.

Les taux d'immunisation ont été fixés d'après les résultats de l'évaluation de la couverture vaccinale chez les rats laveurs effectuée au Québec en 2007 (Bélanger, Séguin et al. 2008).

3.4 Analyse des résultats

3.4.1 Analyse des itérations

Pour chaque itération, une courbe représentant le nombre de cas annuels de rage et le nombre de cellules infectées annuelles en fonction du temps a été réalisée.

La représentation géographique du nombre de cellules infectées de la région d'étude selon un pas de temps annuel a été réalisée sur un échantillon aléatoire d'itérations pour chaque scénario.

Si les patrons de dispersion géographiques des épidémies simulées étaient très disparates d'une itération à l'autre au sein d'un même scénario, les itérations similaires géographiquement ont été regroupées en 'type' selon leurs caractéristiques géographiques de dispersion.

3.4.2 Calcul d'une itération moyenne

La sélection d'une itération moyenne s'est réalisée parmi le type géographique de dispersion majoritairement représentée au sein du scénario.

Les valeurs médianes annuelles du nombre de cellules infectées par itérations et pour l'ensemble des itérations ont été calculées. L'itération sélectionnée a été celle dont la médiane se rapprochait le plus de la médiane générale.

3.4.3 Calcul de la population humaine à risque

L'itération moyenne sélectionnée nous a permis de calculer les populations humaines à risque selon les critères modifiés de zone à risque tels que définit par le Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec et l'Institut de Santé Publique du Québec (Lambert, Deshaies et al. 2007). Les modifications ont abouti à la définition suivante :

La zone à risque pour chaque année est composée des MRC infectées par au moins 1 cas de rage du raton laveur au cours de l'année ainsi que les MRC adjacentes à ces MRC infectées. Les MRC de Laval, Montréal, Deux-Montagne, Thérèse de Blainville et Les Moulins forment un bloc, c'est-à-dire que si une MRC de la rive Sud en regard de l'île de Montréal est touchée, les trois MRC citées plus haut passeront en statut 'à risque' d'un coup.

Il a également été pris en compte dans notre calcul le fait qu'une zone déclarée à risque une année le restait les deux années suivantes même si elle ne correspondait plus au critère de zone à risque (période de latence de 2 ans avant retour au statut de zone non-à-risque).

Le calcul des populations humaines à risques s'est fait selon l'image de l'épidémie à la 52^{ème} semaine de simulation (i.e. semaine du 31 décembre). Les variations intra-annuelles des populations et du front de la rage n'ont pas été prises en compte.

Selon cette définition de la zone à risque, même si l'agglomération de Montréal n'est pas incluse dans la zone d'étude, sa population est incluse dans le calcul de la population à risque dès qu'une MRC adjacente à l'agglomération de Montréal devient infectée (Figure 3). Le fleuve Saint-Laurent, situé entre l'agglomération de Montréal et la rive-sud, n'a pas été considéré comme une barrière à la dispersion des cas de rage.

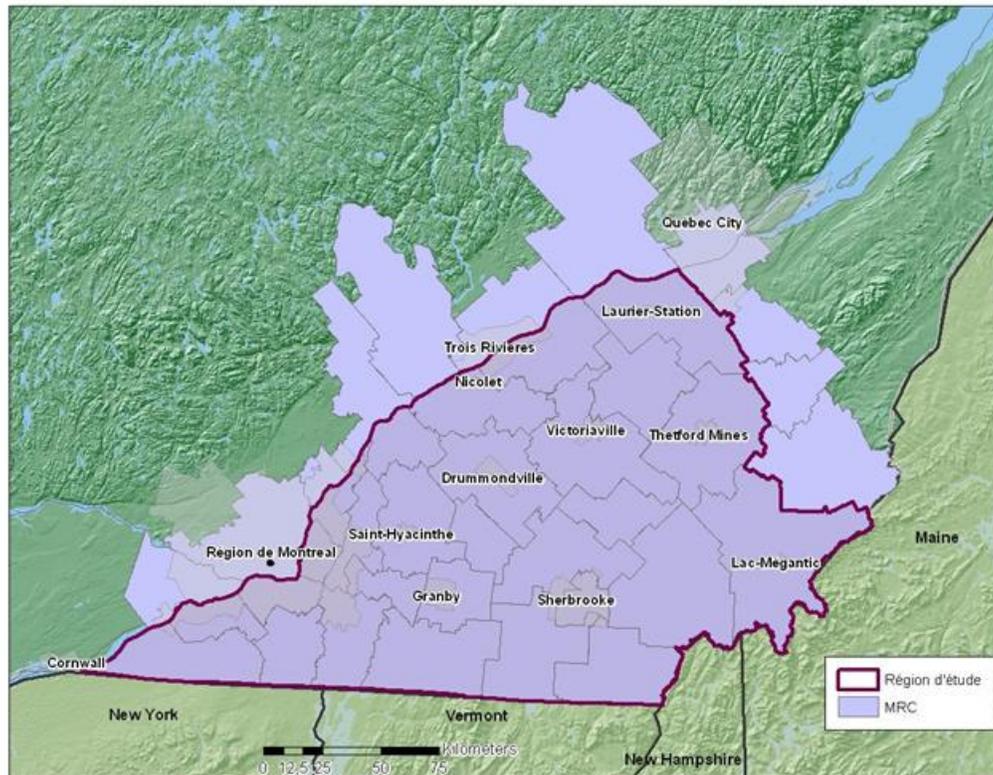


Figure 3 : Localisation géographique de la zone d'étude (région d'étude) et de la zone potentiellement à risque pour la population humaine (MRC en mauve).

4 Résultats

4.1 Scénario 1

4.1.1 Analyse des itérations

Pour chacun des 93 itérations, une courbe du nombre de cas de ratons rabiques par an et du nombre de cellules ORM infectées par an a été réalisée.

Pour 43 itérations sur les 93, une représentation géographique des cellules ORM atteintes contenant des ratons rabiques à la 52^{ème} semaine de chaque année a été réalisée. Seulement 15 de ces 43 itérations ont été représentées avec des cartes séquentielles de la propagation de l'épidémie.

Deux types de dispersion géographique ont été identifiés pour le scénario 1. Ces types ont été définis de la façon suivante :

- ❖ type a : propagation du front épidémique sans résurgence en arrière du front (exemple de l'itération 26 - Figure 4);

- ❖ type b : propagation du front épidémique avec résurgence en arrière du front (exemple de l'itération 1 - Figure 5).

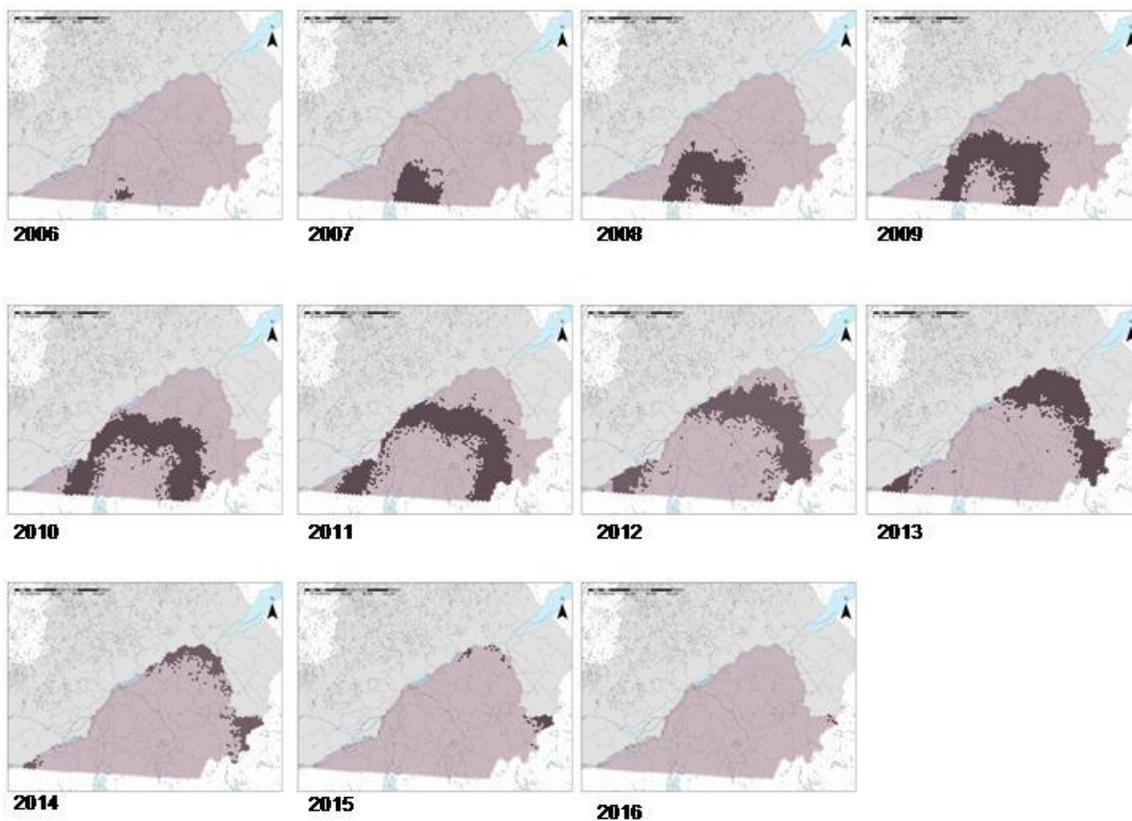


Figure 4 : Dispersion de la rage selon le scénario 1 sans résurgence (type a) (itération 26). L'année 2017 n'est pas représentée car elle ne contient aucun cas.

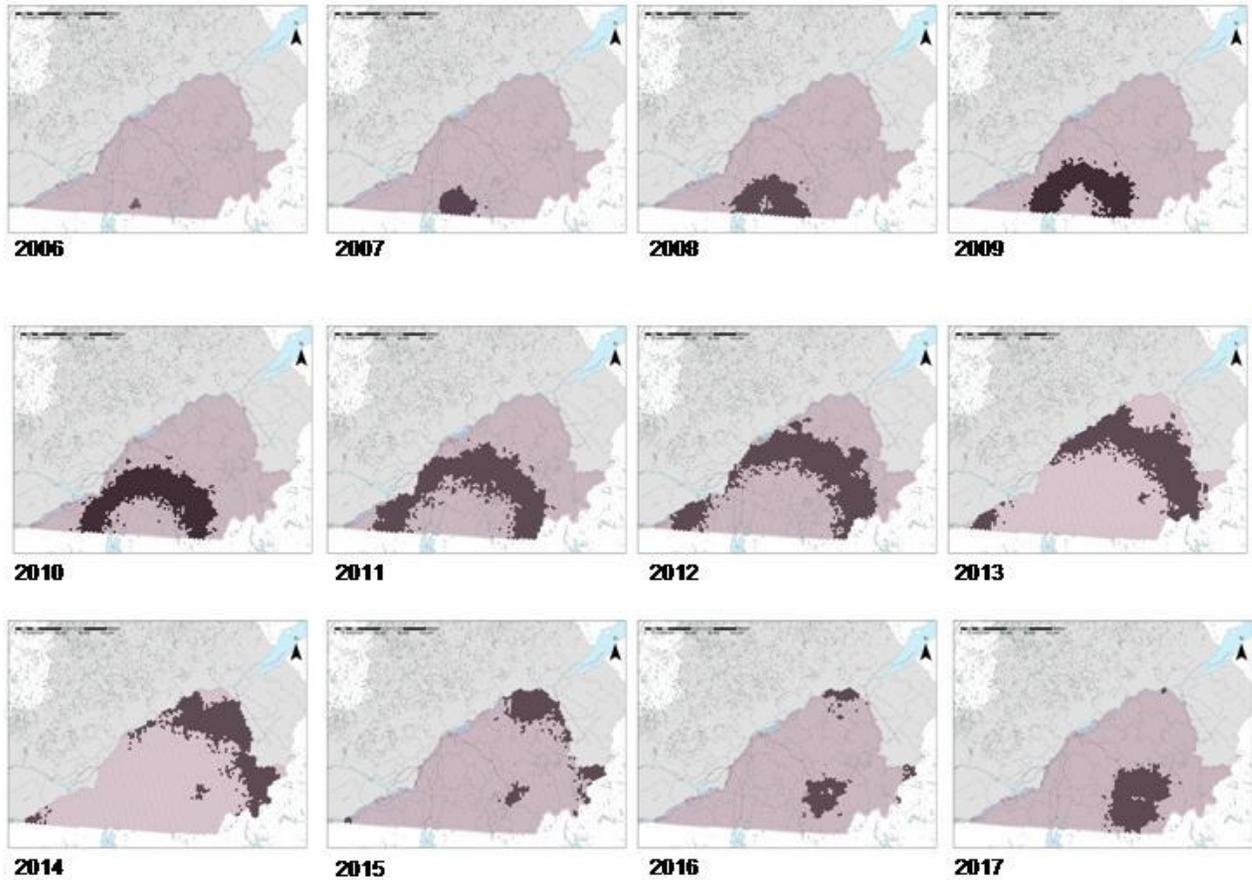


Figure 5 : Dispersion de la rage selon le scénario 1 avec résurgence (type b) (itération 1)

Le nombre moyen de rats rabiques par an ainsi que le nombre moyen de cellules infectées par an a été calculé selon les deux types de dispersion (Figure 6 et Figure 7).

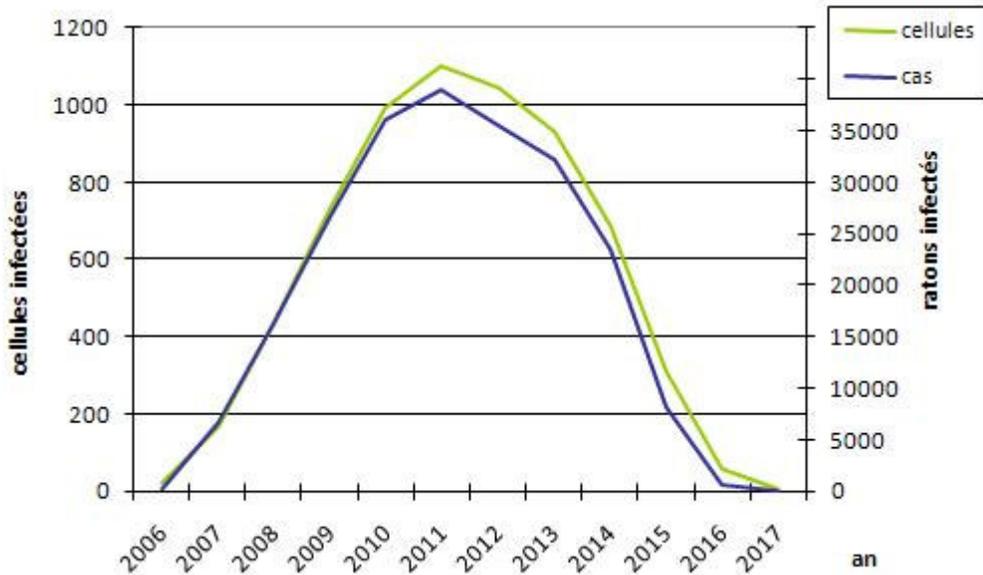


Figure 6 : Courbe du nombre de cas de rats rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2017 selon le Scénario 1 (dispersion de type a)

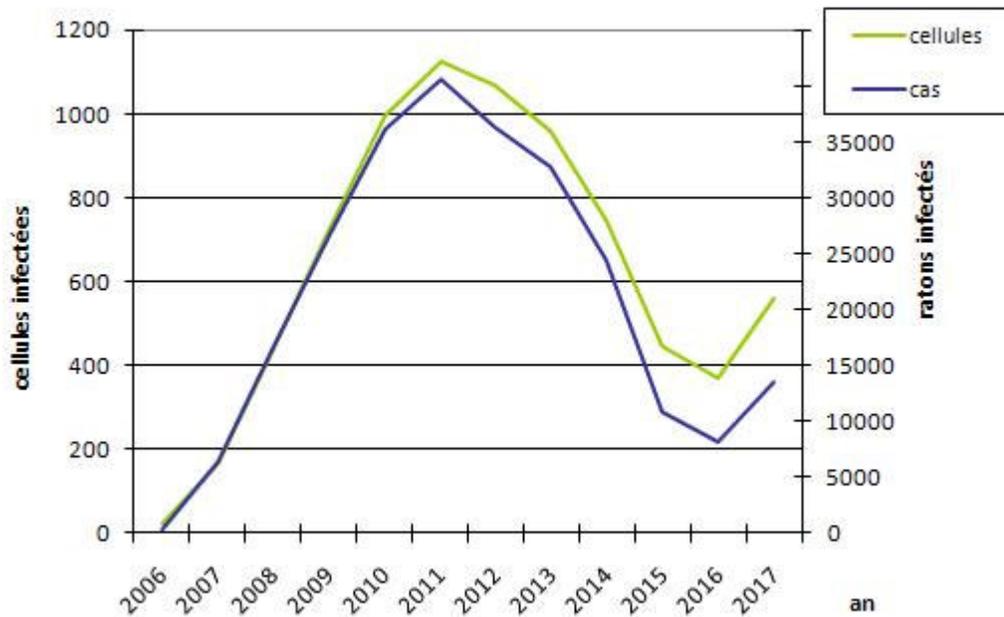


Figure 7 : Courbe du nombre de cas de rats rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2017 selon le Scénario 1 (dispersion de type b)

4.1.2 Sélection d'une itération moyenne

Nous avons décidé que le **type a** représenterait notre épidémie moyenne car la dispersion de **type a** a lieu dans 75 itérations sur les 93 (80,64%) alors que la dispersion de **type b** a lieu dans 18 itérations sur les 93 (19,36%).

La sélection d'une itération 'moyenne' pour calculer les populations humaines à risque s'est effectuée de la façon suivante : sur des critères visuels, nous avons sélectionné 11 itérations à dispersion radiale parmi les 15 de **type a** qui avaient été représentés géographiquement avec des cartes séquentielles (les 4 itérations abandonnées avaient une dispersion légèrement elliptique). Sur ces 11 itérations, l'itération sélectionnée était celle dont la médiane se rapprochait le plus de la médiane générale (itération 26) ($médiane_{26} = 617$, $médiane_{générale} = 607$).

4.1.3 Calcul des populations humaines à risque

L'itération 26 nous a permis de calculer les populations humaines à risque selon les critères modifiés de zone à risque tels que définis par le Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec et l'Institut de Santé Publique du Québec (Lambert, Deshaies et al. 2007).

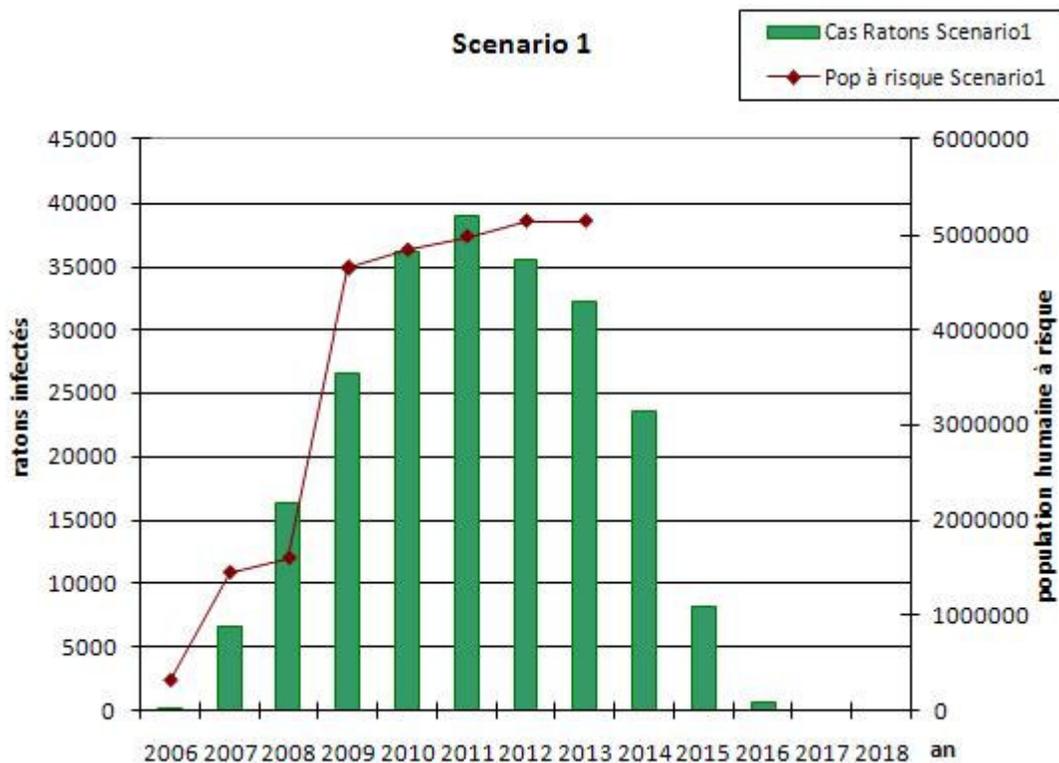


Figure 8 : Résultats du nombre de cas annuels de rats rabiques et nombre d'humains à risque pour le Scénario 1 de 2006 à 2017.

NB : Pour la Figure 8, nous avons choisi de ne pas représenter la population humaine à risque pour les années après 2013 pour éviter que la diminution du nombre d'êtres humains à risque ne soit interprétée comme la disparition de l'épidémie du Québec. En effet, l'épidémie de rage sort de notre zone d'étude à partir de 2011 mais elle ne sort pas du Québec.

4.2 Scénario2

4.2.1 Analyse des itérations

Selon les résultats des 59 itérations, il semble qu'un seul type de dispersion peut se présenter pour le scénario 2.

Pour 21 itérations sélectionnées au hasard sur les 59, une représentation géographique des cellules infectées contenant des rats rabiques à la 52ème semaine de chaque année a été réalisée.

La propagation spatiale de l'épidémie a été illustrée par l'itération 6 (Figure 9).

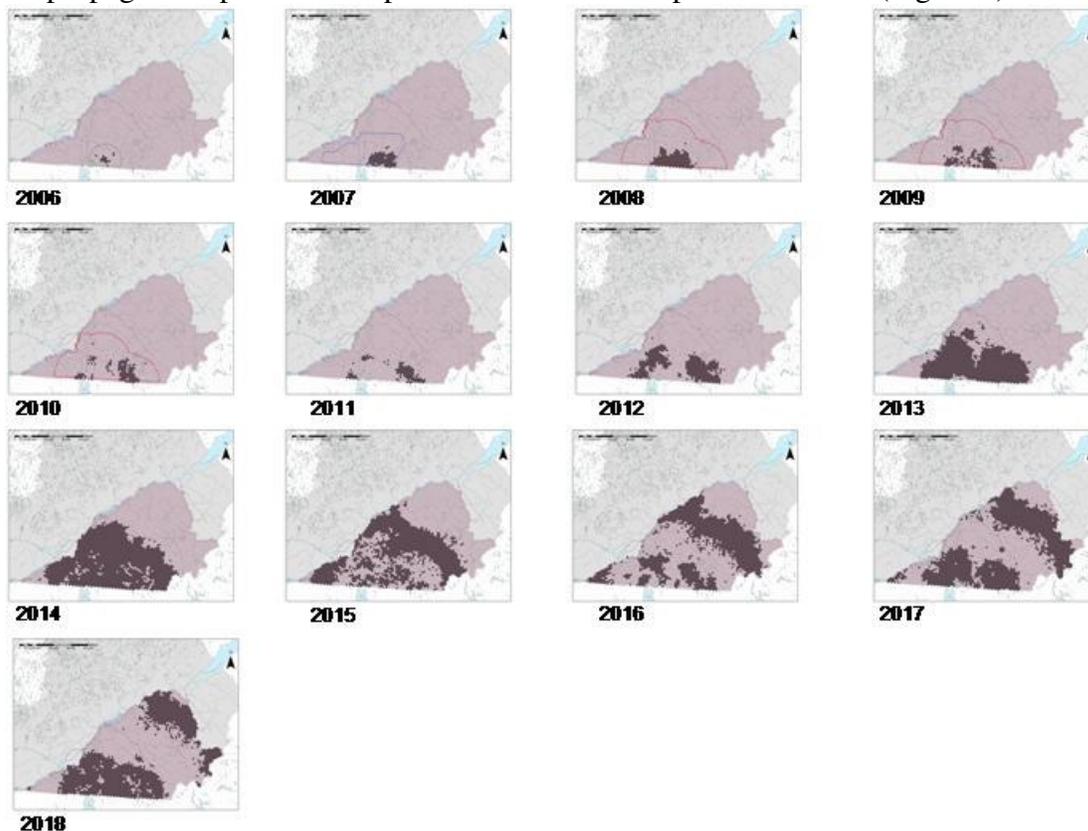


Figure 9 : Dispersion de la rage selon le scénario 2 (itération 6). Les polygones d'action de contrôle sont représentés sur les cartes en vert pour 2006, en bleu pour 2007 et en rouge pour 2008 à 2010 inclus.

Le nombre moyen de rats rabiques par an ainsi que le nombre moyen de cellules infectées par an a été calculé (Figure 10).

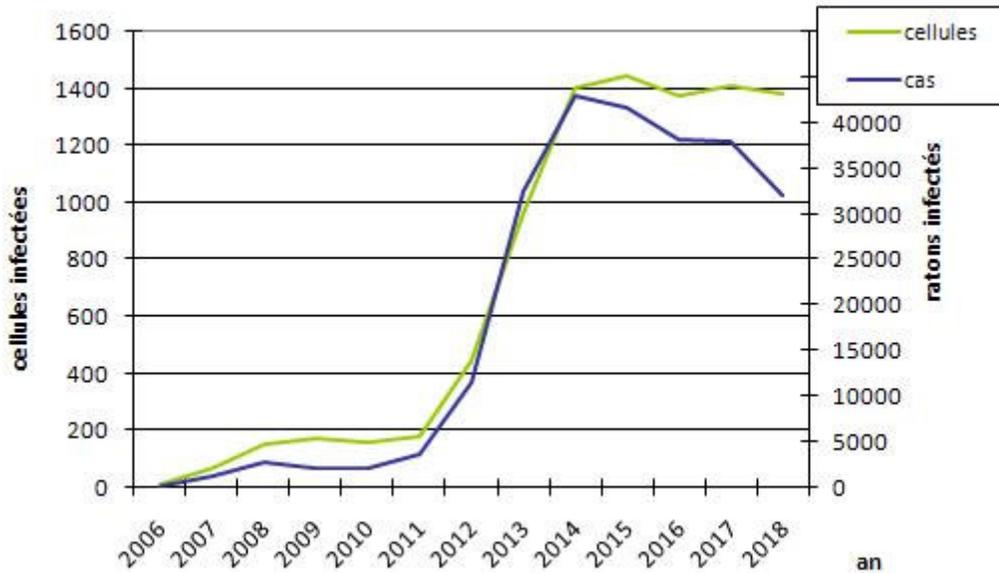


Figure 10 : Courbe du nombre de cas de rats rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2018 selon le Scénario 2.

4.2.2 Sélection d'une itération moyenne

La sélection d'une itération 'moyenne' pour calculer les populations humaines à risque s'est effectuée de la façon suivante : nous avons calculé la valeur médiane annuelle du nombre de cellules ORM infectées par itérations, et pour l'ensemble des 59 itérations. L'itération sélectionnée (itération 6) a été celle dont la médiane se rapprochait le plus de la médiane générale (médiane₆ = 381, médiane_{générale} = 381).

4.2.3 Calcul des populations humaines à risque

L'itération 6 nous a permis de calculer les populations humaines à risque selon les critères modifiés de zone à risque tels que définis par le Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec et l'Institut de Santé Publique du Québec (Lambert, Deshaies et al. 2007).

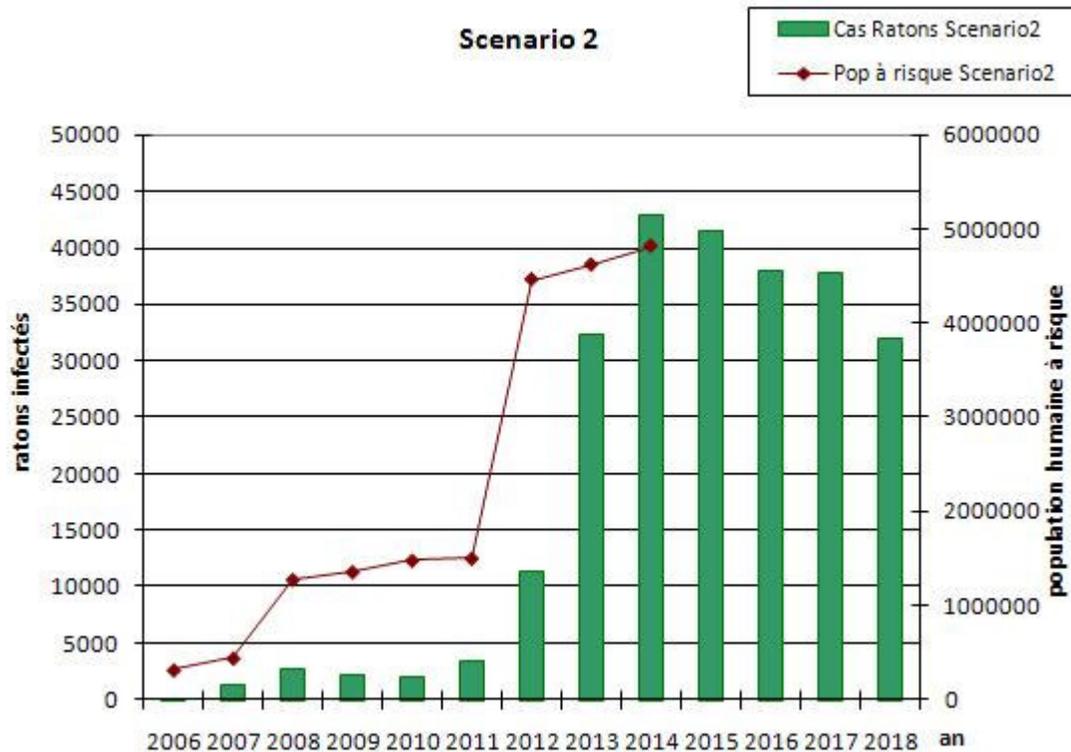


Figure 11 : Résultats du nombre de cas annuels de ratons rabiques et nombre d’humains à risque pour le Scénario 2, entre 2006 et 2018.

NB : Pour la figure 9, nous avons choisi de ne pas représenter la population humaine à risque pour les années après 2014 pour éviter que la diminution du nombre d’êtres humains à risque ne soit interprétée comme la disparition de l’épidémie du Québec. En effet, l’épidémie de rage sort de notre zone d’étude à partir de 2014 mais elle ne sort pas du Québec.

4.3 Scénario3

4.3.1 Analyse des itérations

Pour 10 itérations sur les 70, une représentation géographique des cellules infectées contenant des ratons rabiques à la 52ème semaine de chaque année a été réalisée.

Il semble que deux types de dispersion géographique puissent avoir lieu pour le scénario 3. Ces types sont définis de la façon suivante :

- ❖ type a : résurgence d’une situation épidémique (croissance exponentielle des cas) après 2013;
- ❖ type b : résurgence d’une situation épidémique (croissance exponentielle des cas) avant 2013.

Les deux types de dispersion pour le scénario 3 semble correspondre avec une propagation horizontale (axe est-ouest) des cas pour le type a, et selon une propagation verticale (axe nord-sud) des cas pour le type b.

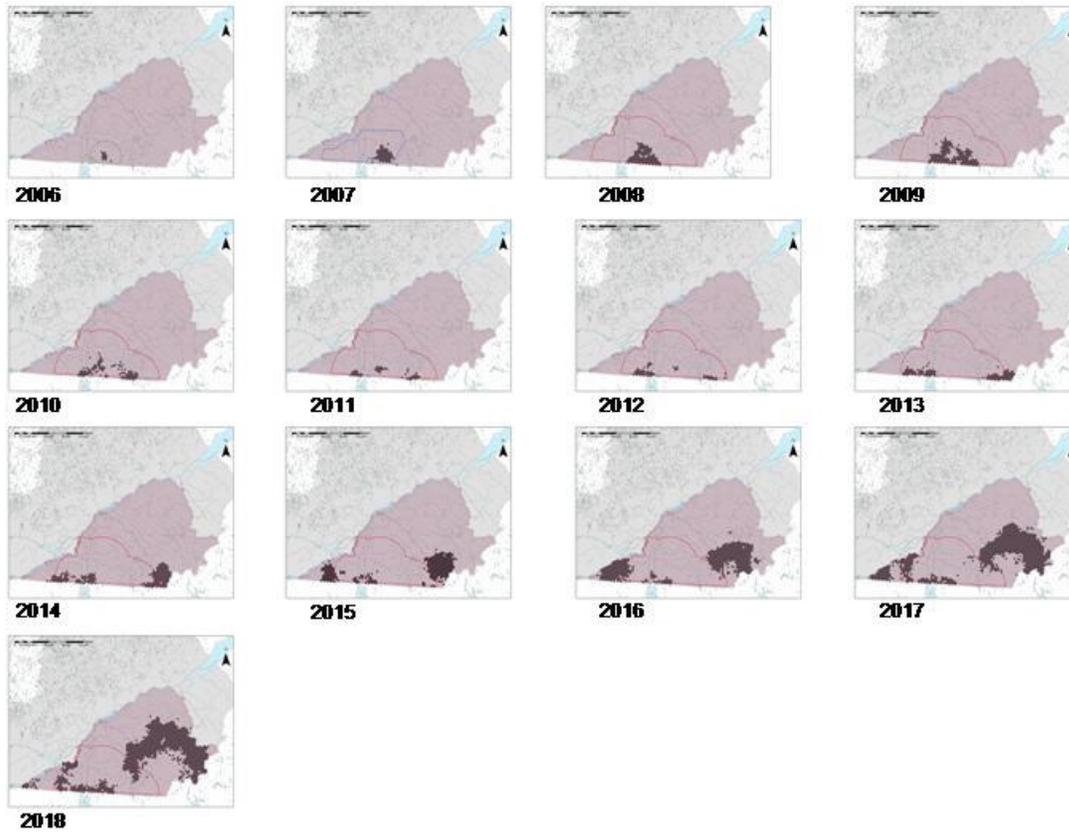


Figure 12 : Dispersion de la rage selon le scénario 3 (itération 68) (type a). Les polygones d'action de contrôle sont représentés sur les cartes en vert pour 2006, en bleu pour 2007 et en rouge pour 2008 à 2018 incluse.

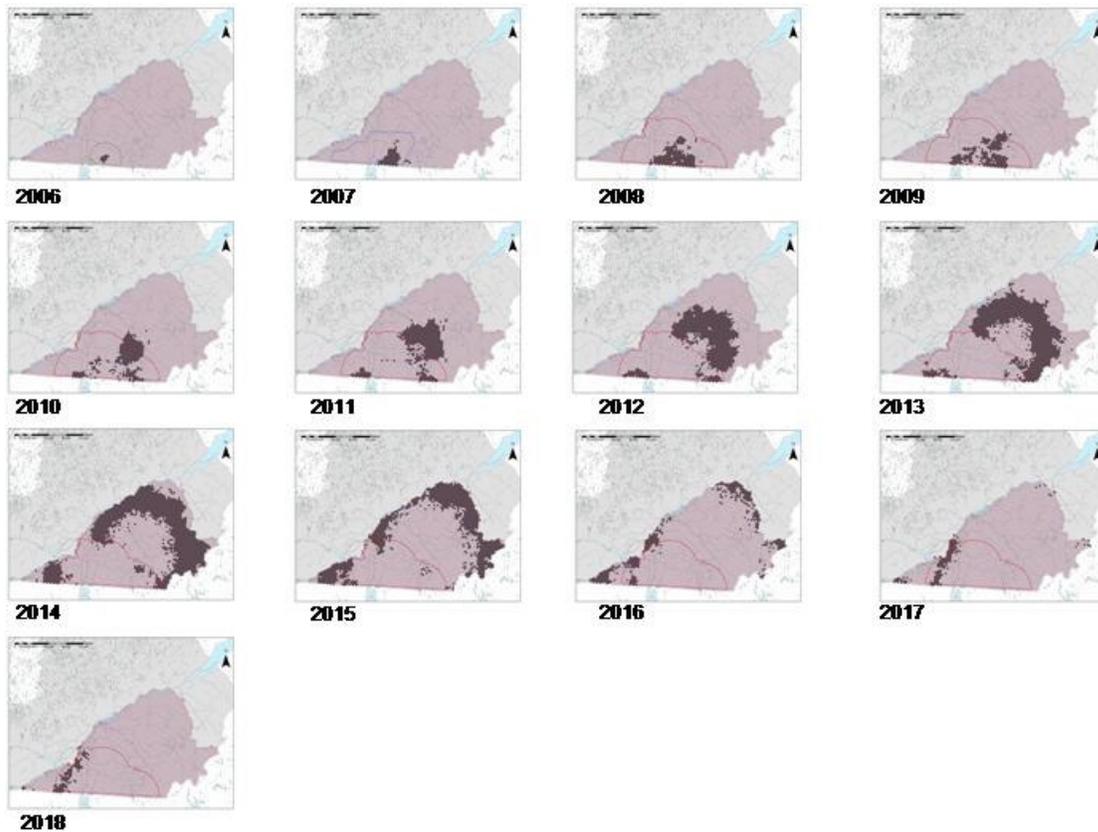


Figure 13 : Dispersion de la rage selon le scénario 3 (itération 16) (type b). Les polygones d'action de contrôle sont représentés sur les cartes en vert pour 2006, en bleu pour 2007 et en rouge pour 2008 à 2018 incluse.

Le nombre moyen de rats rabiques par an ainsi que le nombre moyen de cellules infectées par an a été calculé selon les deux types de dispersion (Figure 14 et Figure 15).

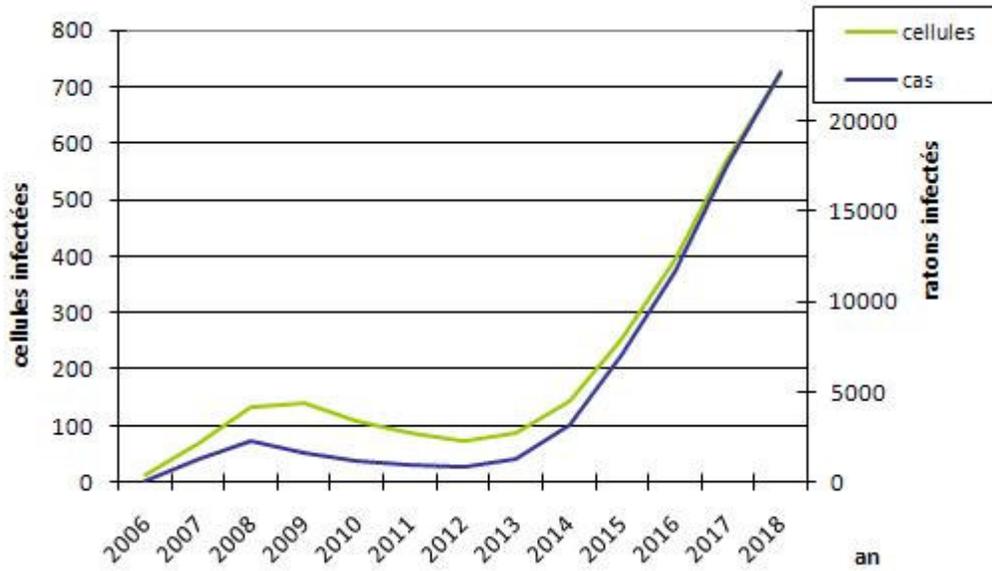


Figure 14 : Courbe du nombre de cas de rats rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2018 selon le Scénario 3 (type a).

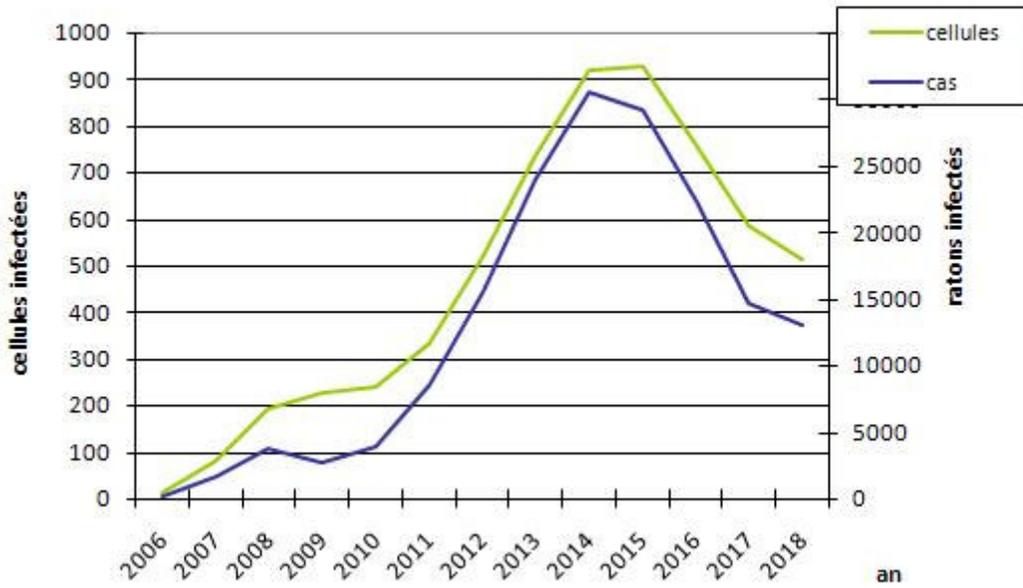


Figure 15 : courbe du nombre de cas de rats rabiques annuels moyen et du nombre de cellules infectées annuellement moyen de 2006 à 2018 selon le Scénario 3 (type b).

4.3.2 Sélection d'une itération moyenne

Nous avons décidé que le **type a** représenterait notre épidémie moyenne car la dispersion de **type a** a lieu dans 55 itérations sur les 70 (78,6%) alors que la dispersion de **type b** a lieu dans 15 itérations sur les 70 (21,4%).

La sélection d'une itération 'moyenne' pour calculer les populations humaines à risque s'est effectuée de la façon suivante : nous avons calculé la valeur médiane annuelle du nombre de cellules ORM infectées par itérations, et pour l'ensemble des 55 itérations. L'itération sélectionnée (itération 68) a été celle dont la médiane se rapprochait le plus de la médiane générale (médiane₆₈ = 119, médiane_{générale} = 119).

4.3.3 Calcul des populations humaines à risque

L'itération 68 nous a permis de calculer les populations humaines à risque selon les critères modifiés de zone à risque tels que définis par le Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec et l'Institut de Santé Publique du Québec (Lambert, Deshaies et al. 2007).

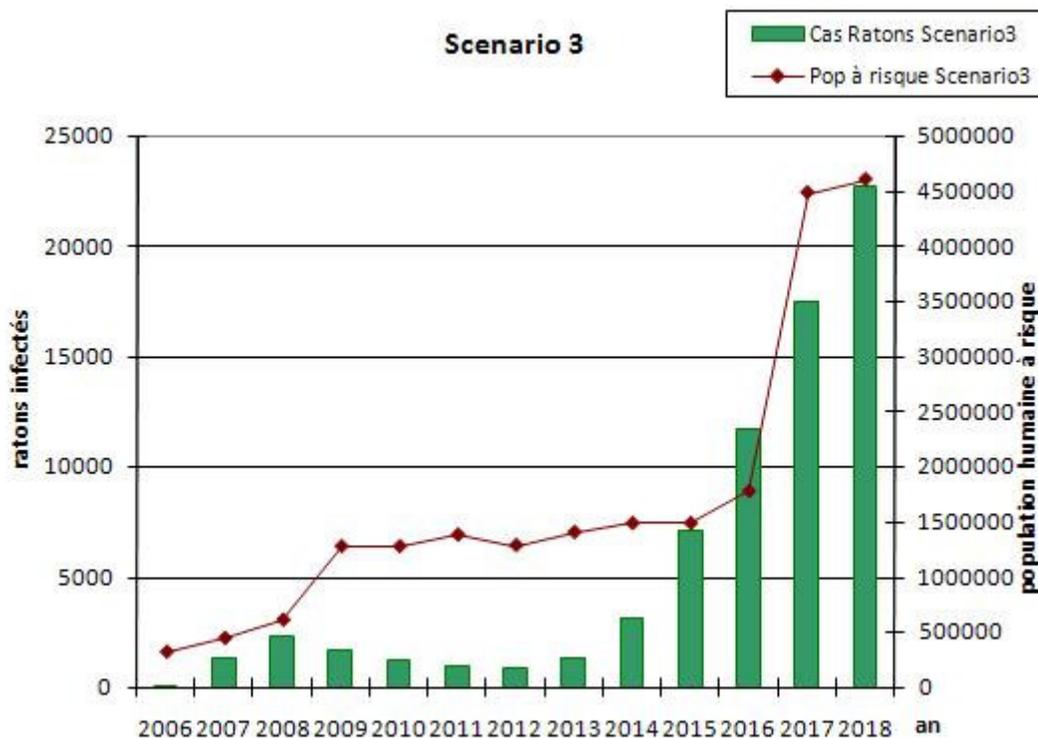


Figure 16 : Résultats du nombre de cas annuels de rats rabiques et nombre d'êtres humains à risque pour la Scénario 3 de 2006 à 2018.

NB : Pour la Figure 16, nous avons choisi de représenter la population humaine à risque jusqu'en 2018 car l'épidémie de rage persiste durant toutes les 13 années dans notre zone d'étude.

5 Discussion

Les résultats de simulations obtenus suggèrent que le choix des opérations de terrain peut avoir un effet important sur la vitesse de propagation de l'épidémie. Ainsi, dans toutes les itérations de l'épidémie simulée selon le scénario (1) le front épidémique a progressé rapidement pour atteindre les limites de la zone d'étude en quelques années seulement. Dans le cas des scénarios (2) et (3), la progression de l'épidémie a été notablement ralentie par rapport au scénario (1) pendant les années durant lesquelles une vaccination était effectuée. Toutefois une reprise d'une progression rapide similaire à celle observée en absence de mesure de contrôle a été observée après l'arrêt de la vaccination pour le scénario (2) et lors de la sortie des cas de la zone de vaccination (au sein de la zone d'étude) pour le scénario (3).

La population à risque augmente de façon drastique lorsque l'épidémie atteint la rive sud du Saint-Laurent puisqu'en raison de la définition des zones à risques la métropole se trouve alors incluse dans le calcul des populations humaines à risque.

Un certain nombre de points méthodologiques doivent être gardés à l'esprit lors de l'interprétation des résultats :

Les simulations ont été réalisées en considérant que l'ensemble de notre zone d'étude était peuplée par une population de rats dont la densité oscillait autour d'une valeur unique de capacité de support du milieu. On sait pourtant qu'en réalité, les densités de rats sont très associées au milieu (Totton, Rosatte et al. 2004; Randa and Yunger 2006; Beasley, Devault et al. 2007) et qu'il existe probablement des agrégats de densité de population plus ou moins élevés en fonction du milieu. Toutefois, en l'absence de données précises sur la structure de l'hétérogénéité spatiale de la capacité de support du milieu pour les rats dans notre zone d'étude nous avons choisi d'utiliser une structure homogène. La valeur choisie a été basée sur les données les plus précises à notre disposition à l'heure actuelle (Daigle and Vandal 2007).

Il a largement été démontré que certaines barrières naturelles (rivières, montagnes, etc.) avaient un impact sur la propagation d'une épidémie de rage du raton laveur soit en ralentissant le front, soit en le réorientant (Smith, Lucey et al. 2002; Rees, Pond et al. 2008; Root, Puskas et al. 2008; Cullingham, Kyle et al. 2009). Toutefois, en l'absence d'éléments précis nous permettant de quantifier l'impact des barrières naturelles présentes dans notre zone d'étude (rivière Richelieu, fleuve Saint-Laurent) sur la propagation de l'épidémie, et étant donné que l'effet 'barrière' d'une rivière semble très discutable en fonction de ses caractéristiques propres telles que le fait qu'elle gèle en hiver (Cullingham, Kyle et al. 2009), nous avons choisi de ne pas considérer de barrières naturelles dans nos simulations. Nous croyons cependant que les conclusions générales tirées à propos de l'impact de la vaccination seraient toujours valides.

La simulation de la transmission de la rage du raton laveur a nécessité d'utiliser une valeur pour la proportion des contacts entre les rats sains (susceptibles) et rabiques (infectieux) pour laquelle il y avait effectivement infection d'un raton sain et susceptible.

La valeur par défaut proposée dans ORM est de 3.5%. À l'heure actuelle, les données nécessaires à l'évaluation de cette valeur pour la zone d'étude simulée ne sont pas disponibles. Il est cependant important de comprendre qu'une valeur différente pourrait avoir eu un effet sur l'impact de la stratégie de vaccination.

Notre zone d'étude correspond à une petite partie seulement du sud du Québec. Toute extrapolation des résultats obtenus dans ce travail (vitesse de l'épidémie, sens, direction) devrait être effectuée avec une grande prudence car on ne sait pas si la capacité de support du milieu serait identique à notre zone d'étude dans le reste du Québec. C'est probablement particulièrement important pour les zones situées en milieu urbain, pour lesquelles très peu d'information quantitative sur la dynamique populationnelle des rats est disponible.

Les durées des simulations (12 ou 13 ans en fonction des scénarios) ont été choisies *a priori* de manière arbitraire à la demande des auteurs de l'étude coût-bénéfice. Le fait que dans certains scénarios l'épidémie sorte très rapidement de la zone d'étude aurait justifié le choix d'une zone de simulation plus étendue pour permettre des durées de simulation aussi longues. Cela aurait permis d'avoir une population à risque pour le scénario 1 et 2 pour toute la durée de la simulation. Mais ce facteur (rapidité de la vitesse de dispersion de la rage sans méthode de contrôle) ne pouvait être connu *a priori*.

Les scénarios ont été basés sur l'utilisation d'un budget et de mesures de contrôle constant pour les années où des actions ont été entreprises. Les scénarios ne visaient pas à mimer exactement les actions de contrôles qui ont réellement eu lieu sur le terrain, notamment les campagnes de dépeuplement de 2006 et 2007. Pour ces raisons, ce travail ne constitue pas une évaluation du programme de contrôle réalisé au Québec depuis 2006 et ne devrait pas être interprété comme tel.

Le nombre d'itérations effectuées pour chacun des scénarios a été contraint par la disponibilité de ressources informatiques et le délai accordé pour la livraison des résultats. La similarité des patrons des épidémies observée au sein de chaque type nous laisse penser que ce nombre d'itérations était suffisant pour répondre adéquatement à la question d'étude.

Le protocole réalisé ne permet pas d'éliminer la possibilité qu'un biais puisse résulter de l'utilisation d'une population de rats de départ unique ou de la méthode de sélection d'une épidémie moyenne.

Comme le cas index ne pouvait être programmé dans ORM qu'en introduisant une valeur entière de pourcentage ($\geq 1\%$) d'infection de la population de rats présente dans la cellule du cas index, nous avons cherché à connaître le nombre de rats présents dans cette cellule à la 23^{ème} semaine de l'année (date d'apparition du cas index). Ce nombre est variable d'une année sur l'autre (stochasticité du modèle), mais pour en avoir une idée approximative, nous avons cherché le nombre de rats présents dans cette cellule la 23^{ème} semaine de l'année précédent 2006. Ce nombre était de 149 rats.

Pour simuler un cas index dans une population de 149 rats environ, nous devions infecter 0.67% de la population. Hors, ORM ne nous permettait pas d'infecter une population à un taux inférieur à 1%. Nous avons donc pris 1% d'infection en nous attendant à ce que certaines années il y ait 2 cas index qui apparaissent à la 23ème semaine au lieu de 1. Nous ne pensons pas que ceci ait pu fausser nos simulations parce qu'un cas index est une notion discutable surtout lors d'une épidémie dans une espèce de la faune : le véritable cas index n'est souvent pas repéré et lorsque l'on repère un cas, il est représentatif de nombreux autres cas rabiques non détectés.

En conclusion, l'ORM semble un progiciel adapté et efficace pour la modélisation de la propagation de la rage du raton laveur au Québec. Il nous a permis de simuler dans les délais accordés les épidémies de rage du raton laveur qui ont servi à calculer les populations humaines à risques nécessaires à la réalisation d'une étude coûts-bénéfices. Les simulations présentées montrent un impact majeur des mesures de contrôle comme la vaccination sur la dispersion de la rage. Certaines limites d'interprétations des résultats sont toutefois à conserver à l'esprit notamment celles liées à la connaissance de données empiriques de calage du modèle adaptées au contexte québécois (i.e.. densité de populations de rats).

6 Références bibliographiques

- Beasley, J. C., T. L. Devault, O. E. Rhodes, 2007. Home-range attributes of raccoons in a fragmented agricultural region of northern Indiana. *Journal of Wildlife Management*. 71(3), 844-850.
- Bélanger, D., G. Séguin, S. Lair, J. Viau (2008). Évaluation de la couverture vaccinale contre la rage du raton laveur chez le raton laveur (*Procyon lotor*) et la moufette rayée (*Mephitis mephitis*) suite au largage d'appâts vaccinaux Onrab par voie aérienne, Montérégie, 2007. Rapport préliminaire: 30pp.
- Cullingham, C. I., C. J. Kyle, B. A. Pond, E. E. Rees, B. N. White, 2009. Differential permeability of rivers to raccoon gene flow corresponds to rabies incidence in Ontario, Canada. *Molecular Ecology*. 18(43-53).
- Daigle, G., N. Vandal, 2007. Estimation de la densité de rats laveurs (*Procyon lotor*) et de moufettes (*Mephitis mephitis*) dans les secteurs couverts par les opérations de contrôle de la rage à Dunham en Montérégie. Service de consultation statistique – Département de mathématiques et statistiques de l'Université Laval, Laval. pp. pp8.
- Lambert, L., D. Deshaies, C. Gaulin, S. Lacoursière, J. Picard, 2007. Guide d'intervention visant la prévention de la rage humaine. Comité sur la révision du protocole d'intervention visant la prévention de la rage humaine. Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec. pp. 203pp.
- Randa, L. A., J. A. Yunker, 2006. Carnivore occurrence along an urban-rural gradient: A landscape-level analysis. *Journal of Mammalogy*. 87(6), 1154-1164.
- Rees, E. E., B. Pond, C. I. Cullingham, R. Tinline, D. Ball, C. J. Kyle, B. N. White, 2008. Assessing a landscape barrier using genetic simulation modelling: Implications for raccoon rabies management. *Preventive Veterinary Medicine*. 86(107-123).
- Root, J. J., R. B. Puskas, J. W. Fischer, C. B. Swope, M. A. Neubaum, S. A. Reeder, A. J. Piaggio, 2008. Landscape genetics of raccoons (*Procyon lotor*) associated with ridges and valley of Pennsylvania: implications for oral rabies vaccination programs. *Vector Borne Zoonotic Dis*. 1-6.
- Smith, D. L., B. Lucey, L. A. Waller, J. E. Childs, L. A. Real, 2002. Predicting the spatial dynamics of rabies epidemics on heterogeneous landscapes. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 99(6), 3668-72.
- Tinline, R. (2007). The Ontario Rabies Model Guide. Kingston, Ontario, GIS Lab, Queen's University, Ontario, Canada 96p.
- Tinline, R., D. Ball, J. Broadfoot, B. Pond (2009). The Ontario Rabies Model. Kingston, Ontario, GIS Lab, Queen's University, Ontario, Canada 45p.
- Totton, S. C., R. C. Rosatte, R. R. Tinline, L. L. Bigler, 2004. Seasonal home ranges of raccoons, *Procyon lotor*, using a common feeding site in rural eastern Ontario: Rabies management implications. *Canadian Field-Naturalist*. 118(1), 65-71.

7 Annexes

7.1 Annexe 1 : Valeurs ORM par défaut

Paramètres modèle ORM – valeurs par défaut

No	Paramètre	Var. Temps	Var. Espace	Définition	Valeur
1	Cellule	non	non	Taille et forme de la cellule de base	Hexagone, 2km de rayon
2	K	non	oui	Capacité de support de la cellule pour l'espèce raton	100 homogène
3	In Resistance (SuperCell)	non	Oui (mais identique pour une seule et même supercell)	pourcentages à interpréter de la façon suivante : 25% signifie qu'à chaque fois qu'un mouvement se fait pour passer la frontière d'une supercell, seulement 75% des ces mouvements ont effectivement lieu (25% de refus de mouvements).	-
4	Out Resistance (SuperCell)	non	oui	(voir ci-dessus)	-
5	Number of years of simulation	---	---	Durée de la simulation	-
6	Age of independance	non	non	Âge auquel se fait le passage bébé-juvénile	20
7	Age Adult	non	non	Âge de passage stade juvénile et adulte	75
8	Mortality adjsuter	non	non	Joue dans rétroaction de K sur la mortalité par cellule	0.2
9	Yearly mean mortality	non	non	Permet de données une valeur de mortalité moyenne par âge (année) et par genre	Cf ci dessous
10	Winter Cull	oui	non	Mortalité annuelle attribuée à la rigueur de l'hiver et indexée sur l'âge (années) et sexe (M,F)	Cf ci-dessous
11	Mating week	non	non	Date d'accouplement	9
12	Birth week	non	non	Date de naissance	18
13	Prevent Incest	non	non		oui
14	Chance of giving birth (Juvenil)	non	non	Probabilité qu'une femelle Juv se reproduise quand elle arrive à la date de reproduction	60%

15	Chance of giving birth (Adult)	non	non	idem	95%
16	Litter Size average	non	Non	Taille d'une portée	4
17	Litter Size variance	non	Non	Dispersion de la taille de la portée	1
18	Litter Sex ratio	Non	non	% de mâle dans la portée	50
19	Possibilité de mouvement	Oui intra-annuel Non inter-annuel	non	Nombre de semaines consécutives au cours desquelles le mouvement est permis	Cf ci-dessous
20	Distance de mouvement	non	non	Nombre de cellules franchies lors du mouvement	Cf ci-dessous
21	Home range	Oui intra-annuel / non inter-annuel	non	Taille du territoire par age et par semaine	22.2% (proba d'interaction avec les cellules adjacentes)
22	Durée de la période d'incubation	non	non	Durée entre l'infection et l'expression du virus	Cf ci-dessous
23	Durée de la période infectieuse	non	non	Durée entre expression du virus et mort du raton	1 week
24	B (spread probability)	non	non	Proba qu'1 contact entre 2 ratons se transforme en contact infectieux	3.5%
25	Use reflective disease spread	non	non	Permet de fixer si les frontière de la zone d'étude réfléchissent ou non les individus les des mouvements	non
26	Initial infection location	oui	oui	Permet de situer la date, le lieu (num de cell), le pourcentage d'individus infectés dans une cellule	--
27	Vaccine effectiveness	non	non	Durée d'effet du vaccin	416 weeks
28	Fertility control effectiveness	non	non	Durée de l'effet du contrôle de la fertilité	52 weeks
29	Culling	oui	oui	dépeuplement	--
30	Vaccine and Fertility control	oui	oui	Vaccination et contrôle de fertilité	--

(9) Yearly mean mortality

age	male	femelle
0	0.6	0.6
1	0.4	0.4
2	0.3	0.3
3	0.3	0.3
4	0.3	0.3
5	0.6	0.6
6	0.6	0.6
7	0.6	0.6

(10) Winter cull

Occur at week : 10

Distribution of the cull by age:

age	male	femelle
0	14	14
1	12	12
2	12	12
3	12	12
4	12	12
5	12	12
6	12	12
7	14	14

% of the population culled for each winter type:

Winter type	%
Very Severe	0
Severe	0
Normal	0
Mild	0
Very Mild	0

(19) Possibilité de mouvements

Young of the Year Male: week 38 to 43

Young of the Year Female: week 8 to 43

Juv and Adult Male: week 8 to 43

Juv and Adult Female: week 8 to 15 and week 38 to 43

(20) Distance de mouvements

cell	Young of the Year Male	Young of the Year Female	Juv & Ad Male	Juv & Adult Female
0	75.1	90.8	88.9	92.3
1	12.9	4.07	4.25	3.06
2	6.5	1.4	2.6	1
3	1.8	0.3	0.9	0.9
4	0.9	0.7	0.7	0.4
5	0.9	0.3	0.9	0.7
6	0.92	1.02	0	0.73
7	0	0	1	0
8	1	1	1	0
9	0	0	0	0
...
49	0	0	0	0

(22) Durée de la période d'incubation

week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
proba	0.01	0.05	0.05	0.10	0.15	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05	0.05	0.02	0.01	0.01

week	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
proba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

week	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
proba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0