

Rapport de stage Master 2 Gestion Intégré des Zoonoses et Maladies Animales Tropicales (GIZMAT)

Modélisation du risque d'introduction et de diffusion de la dermatose nodulaire contagieuse en Corée du Sud

Présenté par :

Lou TIMMERMAN

Le 08 juillet 2026

Sous la direction de :

VERGNE Timothée

DELECROIX Clara

Laboratoire d'accueil :

Laboratoire Interactions Hôtes-Agents Pathogènes,
Équipe EPIDESA

Du 05 janvier 2026 au 05 juillet 2026

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement Timothée Vergne et Clara Delecroix pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce stage, ainsi que pour leur accompagnement tout au long de ces six mois. Leur disponibilité, leurs explications et leurs précieux conseils ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des membres de l'équipe EPIDESA pour leur accueil chaleureux et bienveillant, et pour tous les moments partagés, des Birthday lunch, aux séances de yoga, qui ont rendu cette expérience particulièrement enrichissante.

Je souhaite également adresser mes remerciements à mes co-promotionnaires du Master GIZMAT, avec qui j'ai partagé bien plus qu'une année universitaire. Les raclettes, les parties de jeux, ont fait de cette dernière année la meilleure de mes cinq années d'études supérieures. Merci pour cette belle aventure.

Enfin, mes pensées les plus sincères vont à mes proches, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Merci à ma famille pour leur soutien sans faille tout au long de mon parcours. Merci à mes amis, en particulier à Louann pour m'avoir accueillie chez elle en début de stage, et à Pauline pour ses soirées WII et tiramisu qui ont égayé mes semaines. Et merci à Benjamin, pour avoir été une épaule solide sur laquelle j'ai pu m'appuyer tout au long de ces études.

Résumé :

La dermatose nodulaire contagieuse (DNC) est une maladie vectorielle émergente à fort impact économique. En octobre 2023, la Corée du Sud a déclaré sa première épidémie, atteignant 107 foyers en 33 jours. Face au risque de réémergence, des outils d'aide à la décision sont nécessaires. Cette étude présente la première cartographie du risque d'introduction et de diffusion de la DNC en Corée du Sud, basée sur une approche MCDA-SIG. Trois voies d'introduction ont été modélisées : la dispersion aéroportée de vecteurs infectés via l'outil Tropolink, l'importation de bovins infectés et l'import de vecteurs avec les chevaux. Six voies de diffusion ont été considérées : les mouvements de bovins entre fermes, marchés et abattoirs, la dispersion vectorielle à courte distance et le transport de vecteurs avec les chevaux. Le poids de chaque voie a été estimé par une élicitation structurée de six experts français et coréens. L'importation de bovins ressort comme voie d'introduction prépondérante lorsque la Chine et le Japon déclarent des foyers (poids 34,6), tandis que la dispersion aéroportée depuis la Chine domine lorsque seule la Chine est affectée (poids 44,2). Les simulations confirment la compatibilité d'une introduction par les vents avec la localisation des premiers foyers de 2023. Les cartes identifient les districts de la côte ouest comme les plus à risque. Pour la diffusion, les mouvements de bovins entre fermes constituent la voie prépondérante (poids 33,0). Ces cartes constituent un outil opérationnel pour orienter la surveillance et la gestion selon les scénarios épidémiologiques.

Mots clés : dermatose nodulaire contagieuse ; MCDA ; cartographie du risque ; Corée du Sud ; dispersion vectorielle ; *Stomoxys calcitrans*

Abstract :

Lumpy skin disease (LSD) is an emerging vector-borne disease with significant economic impact. In October 2023, South Korea reported its first outbreak, reaching 107 cases within 33 days. Given the risk of re-emergence, decision-support tools are needed. This study presents the first risk mapping of LSD introduction and spread in South Korea, based on a MCDA-GIS approach. Three introduction pathways were modelled: airborne dispersal of infected vectors using the Tropolink tool, importation of infected cattle, and vector transport via horse imports. Six spread pathways were considered: cattle movements between farms, markets and slaughterhouses, short-range vector dispersal, and vector transport with horses. The relative weight of each pathway was estimated through a structured elicitation of six French and Korean experts. Cattle importation emerges as the predominant introduction pathway when both China and Japan report outbreaks (weight 34.6), while airborne dispersal from China dominates when only China is affected (weight 44.2). Trajectory simulations confirm the compatibility of wind-borne introduction with the location of the first 2023 outbreaks. The maps identify western coastal districts as being at highest introduction risk. For spread, cattle movements between farms represent the predominant pathway (weight 33.0). These maps constitute an operational tool to guide surveillance and management according to regional epidemiological scenarios.

Sommaire

Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	7
Liste des Annexes	8
Introduction.....	9
1. La dermatose nodulaire contagieuse (DNC).....	9
2. Expansion géographique de la DNC	9
2.1 Situation mondiale	9
2.2 Émergence et gestion en Corée du Sud.....	10
3. Modes de transmission et vecteur	12
3.1 Modes de transmission	12
3.2 Stomoxys.....	12
4. Modélisation	14
4.1 Intérêt, apport, utilisation.....	14
4.2 Facteurs de risques	14
4.2.1 Risque d'introduction.....	14
4.2.2 Risque de diffusion	15
5. Objectif et plan de l'étude	15
Matériels et Méthodes	16
1. Voies d'introduction et diffusion de la DNC.....	16
2. Données	16
2.1 Données fournies par l'APQA.....	16
2.2 Données mondiales de densité de bovins.....	17
2.3 Données météorologiques.....	17
3. Modélisation de la dispersion vectorielle	18
3.1 Longue distance	18
3.1.1 Backward	18
3.1.2 Forward	18
3.2 Courte distance	19
4. Modélisation des transports.....	19
4.1 Transports entre les fermes des districts.....	19
4.2 Transports liés aux marchés.....	20
4.3 Transports vers les abattoirs	20
4.4 Transports des vecteurs avec le transport d'animaux.....	20
5. Score d'abondance du vecteur :	20
6. Consultation d'experts et pondération des voies.....	21

7. Géotraitement et génération des cartes.....	21
8. Analyse de sensibilité	22
Résultats	22
1. Risque par voie d'introduction et de diffusion.....	22
1.1 Risque d'introduction	22
1.2 Risque de diffusion	23
1.3 Compatibilité du district	23
2. Élicitation d'experts	24
3. Cartes brutes de risque	25
3.1 Cartes brutes du risque d'introduction.....	26
3.2 Carte brute du risque de diffusion	26
4. Analyse de sensibilité	26
4.1 Analyse de sensibilité de l'introduction	26
4.2 Analyse de sensibilité des cartes de diffusion.....	27
5. Cartes finales de risque	28
5.1 Cartes finales d'Introduction	28
5.2 Cartes finales de diffusion	29
Discussion	30
1. Interprétation des résultats.....	31
1.1 Introduction aéroportée de vecteurs infectés.....	31
1.2 Introduction par l'importation de bovins infectés.....	32
1.3 Introduction de vecteurs infectés via le transport de chevaux.....	33
1.4 Transports locaux d'animaux.....	33
1.5 Consultation d'experts	34
1.6 Analyse de sensibilité	34
1.7 Cartes finales de risque	35
2. Limites et incertitudes	35
2.1 Vecteurs.....	35
2.2 MCDA	36
3. Conclusion et perspectives	37
Références.....	38
Annexes	42

Liste des figures

Figure 1 : Carte de la diffusion du virus de la DNC à travers le monde.....	10
Figure 2 : Distribution spatiales et temporelles de cas de DNC en Corée du Sud.....	11
Figure 3 : Schéma des principales voies identifiées d'introduction et de diffusion de la dermatose nodulaire contagieuse en Corée du Sud.	16
Figure 4: Histogrammes des scores de risques pour chaque voie de diffusion.....	23
Figure 5 : Boxplot des poids obtenus lors de l'écitation d'experts	24
Figure 6 : Score de risque des districts après analyse de sensibilité pour le scénario 1. ...	27
Figure 7 : Score de risque de diffusion du district 52140 après analyse de sensibilité.....	28
Figure 8 : Cartes de risques d'introduction finales	29
Figure 9 : Cartes de risque de diffusion finales	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Poids calculé pour les voies d'introduction de la DNC en Corée du Sud.....25

Tableau 2 : Poids calculés pour les voies de diffusion de la DNC en Corée du Sud25

Liste des Annexes

Annexe 1 : Consultation d'experts : document de synthèse.....	42
Annexe 2 : Consultation d'experts : questionnaire.....	50
Annexe 3 : Calculs	54
Annexe 4 : Matrice de risque	55
Annexe 5 : Analyse de sensibilité	56
Annexe 6 : Cartes du risque d'introduction de vecteurs par les vents.....	59
Annexe 7 : Cartes du risque d'importation de bovins infectés ou de vecteurs infectés avec les chevaux.....	60
Annexe 8 : Matrices des scores du risque des voies de diffusion.....	61
Annexe 9 : Cartes des scores d'abondance des vecteurs	63
Annexe 10 : Carte de la densité de bovins en Corée du Sud.....	64
Annexe 11 : Tables des poids et de l'incertitude attribués par les experts pour les voies d'introduction et de diffusion de la DNC en Corée du Sud.....	65
Annexe 12 : Cartes brutes de risque d'introduction.....	66
Annexe 13 : Cartes brutes de risque de diffusion	67
Annexe 14 : Résultats analyse Forward Tropolink.....	68
Annexe 15 : Cartes d'introduction brutes bis	69
Annexe 16 : Températures moyennes mensuelles par districts en Corée du Sud	70

Introduction

1. La dermatose nodulaire contagieuse (DNC)

La dermatose nodulaire contagieuse est l'une des maladies transfrontalières émergentes les plus importantes. Elle est classée maladie notifiable d'après le code sanitaire des animaux terrestres de l'OMSA (Organisation Mondiale de la Santé Animale) (OIE, 2019). Cette classification est due à sa contagiosité élevée, son pouvoir de diffusion, notamment transfrontalier, et ses conséquences socio-économiques. Cela impacte le marché international, comme il a été observé lors de l'épizootie de 2015-2016 en Europe de l'Est (OMSA, n.d.). La maladie touche les bovins (*Bos taurus* et *Bos indicus*) et les buffles d'eau (*Bubalus bubalis*), mais est non-zoonotique. Elle est causée par un poxvirus du genre Capripoxvirus. Ce virus à ADN enveloppé est proche du poxvirus de la variole ovine et caprine, ce qui rend ces virus indifférenciables avec des tests sérologiques de routine (Al-Salihi, 2014).

Lorsqu'un animal est infecté, il peut présenter des symptômes de la maladie selon plusieurs stades. En premier lieu, il présente une phase d'incubation de 4 jours à 10 jours, voire dans certains cas, jusqu'à 1 mois. Les animaux peuvent ensuite développer des éruptions, conduisant à des nodules sur la peau. D'autres symptômes peuvent être observés, comme des ganglions lymphatiques enflés, une fièvre importante, des sécrétions nasales et oculaires, des mammites, une perte de condition corporelle ou encore des difficultés à se déplacer en raison de l'accumulation de liquide dans les membres inférieurs (Abutarbush et al., 2015). La reproduction peut également être atteinte, avec de l'infertilité temporaire ou permanente chez les taureaux. Chez les vaches, des perturbations de cycle et des avortements peuvent être observés (La situation mondiale de la santé animale, 2025). Pour les cas les plus graves, l'animal peut mourir, avec un taux de mortalité de 1 % à 10 %. La morbidité est parfois élevée avec un taux allant de 5 % à 45 % (Namazi and Khodakaram Tafti, 2021). Ces taux sont très variables en fonction de l'âge des animaux, des races ou encore de la localisation (Islam et al., 2026). Tous ces symptômes peuvent conduire à une perte de poids, une baisse de production, des problèmes de reproduction ou encore à la dégradation du cuir. Ces impacts se traduisent par d'importantes pertes économiques pour les éleveurs, affectant l'ensemble de la filière bovine (Abutarbush et al., 2015).

2. Expansion géographique de la DNC

2.1 Situation mondiale

Ces impacts font de la DNC une maladie à fort enjeu sanitaire mondial, dont l'aire de répartition n'a cessé de s'étendre depuis sa première identification. Les premiers cas ont été rapportés en Afrique australe, en Rhodésie (actuel Zimbabwe) en 1929 (MacDonald R. A. S, 1930). Ce virus s'est répandu ensuite dans les autres pays africains, avant d'y devenir endémique jusqu'au 20ème siècle. À partir de 1990, le virus diffuse hors de l'Afrique avec des cas dans la péninsule arabique comme au Liban en 1993, aux Émirats Arabes Unis en 2000, Oman en 2009 ou encore en Turquie en 2013 (Somasundaram Mathan Kumar, 2011 ; WAHIS, n.d. ; Yazid Khatib, 2025). La

Turquie a d'ailleurs été un pays important dans le passage du virus entre l'Europe et l'Asie. L'année d'après, l'Iran, l'Arménie, ou encore la Grèce ont rapporté leurs premiers cas (WAHIS, n.d.), suivis de la Russie l'année suivante (Yazid Khatib, 2025). La diffusion a continué à travers l'Europe en 2016 en atteignant les pays des Balkans (Bulgarie, Macédoine du Nord, Serbie, Kosovo, Albanie, Monténégro) (WAHIS, n.d.). En 2025, le virus atteint de nouveaux pays en Europe de l'Ouest, comme l'Italie et la France (WAHIS, n.d.). En Asie centrale, le virus est arrivé en 2019 en touchant la Chine, le Bangladesh et l'Inde (Ma et al., 2022 ; Sudhakar et al., 2020). En 2020 et 2021, la zone touchée s'est étendue, et le sud-est du continent s'est vu concerné à son tour, avec notamment Myanmar, le Vietnam, le Sri-Lanka, la Thaïlande ou encore le Cambodge (Mazloum et al., 2023 ; WAHIS, n.d.). Ainsi, en octobre 2023, la Corée du Sud déclara ses premiers cas de dermatose et l'année d'après, en novembre 2024, le Japon (Chu et al., 2023 ; WAHIS, n.d.) (Figure 1).

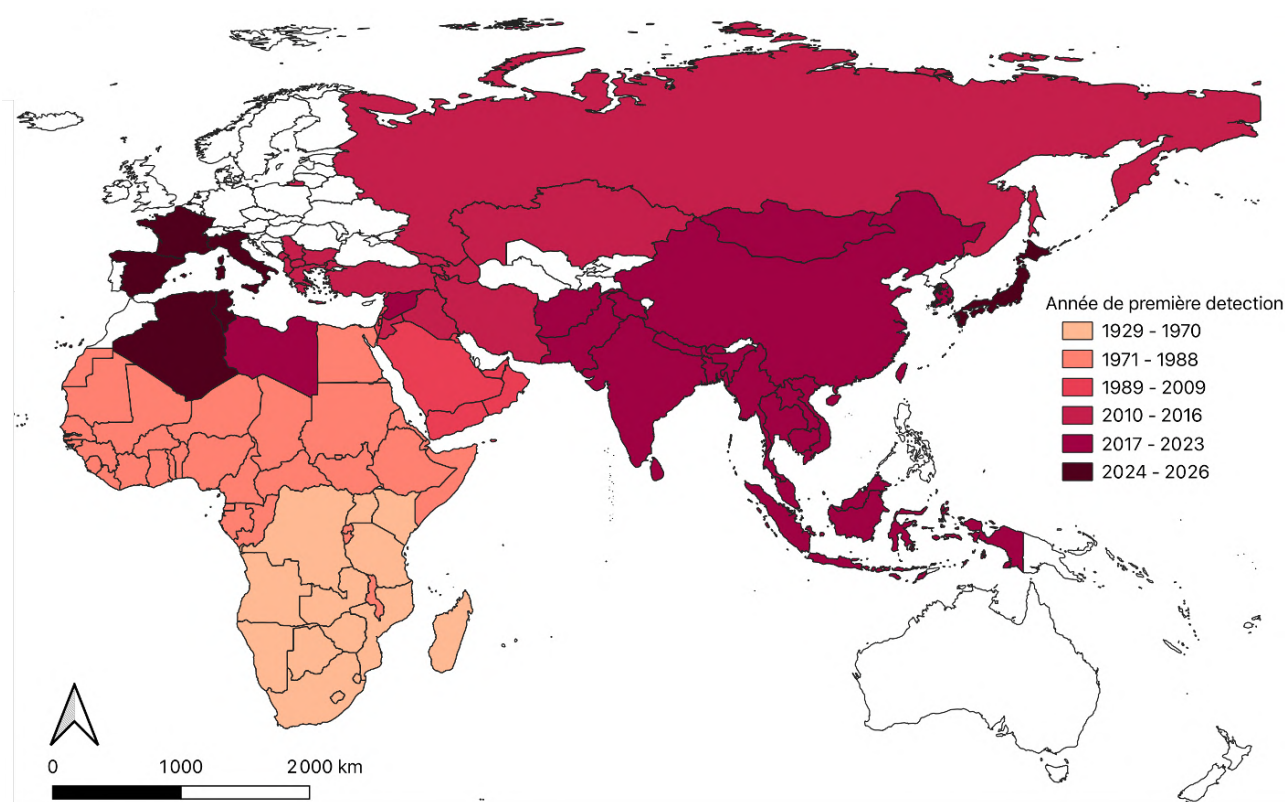


Figure 1 : Carte de la diffusion du virus de la DNC à travers le monde.

La carte est colorée selon l'année de la détection du premier cas de DNC par pays. En blanc figurent les pays n'ayant pas recensé de foyers. Le continent américain n'ayant pas recensé de cas à ce jour, il a été exclu de la carte. Les données sont issues de Lee et al., 2024, pour la période de 1929 à 2023 et de WAHIS pour la période de 2024 à juin 2026.

2.2 Émergence et gestion en Corée du Sud

En octobre 2023 la dermatose nodulaire contagieuse a été détectée pour la première fois en Corée du Sud dans le nord-ouest du pays. Suite à ces premiers foyers, la maladie s'est répandue rapidement à travers le pays, atteignant 107 cas en 33 jours (Figure 2).

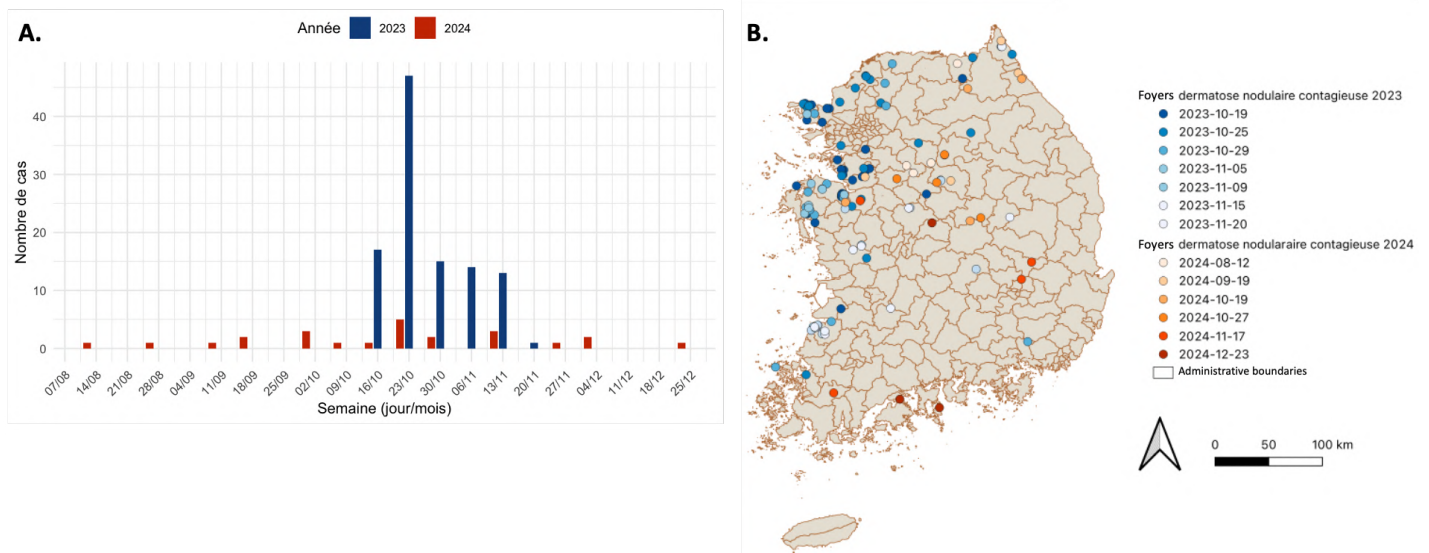


Figure 2 : Distribution spatiales et temporelles de cas de DNC en Corée du Sud.

(A) Évolution hebdomadaire des cas de DNC. (B) Carte des foyers de DNC en Corée du Sud en fonction de leurs dates d'émergence.

Conformément aux consignes nationales, des mesures ont été immédiatement mises en place. Ainsi, trois zones sanitaires ont été définies afin d'identifier au plus tôt de potentiels nouveaux foyers :

- Une zone de gestion (rayon de 500 m autour des foyers) : examens cliniques, tests antigéniques et analyses environnementales
- Une zone de protection (500 m à 3km autour des foyers) : examens cliniques, tests antigéniques
- Une zone de surveillance (3 à 10km autour des foyers) : examens cliniques dans tous les élevages

En complément, les mouvements d'animaux vivants ont été restreints, des mesures de lutte anti-vectorielle ont été mises en place, ainsi que des inspections cliniques dites « intensives ». De plus, dès le 26 octobre 2023, une campagne de vaccination nationale d'urgence a été mise en place en commençant par les zones réglementées. Enfin, des mesures d'abattage réactif ont été mises en oeuvre, consistant à abattre et à enfouir l'ensemble des animaux des élevages infectés (Chu et al., 2023 ; Ra et al., 2024). Cette épidémie a entraîné d'importantes pertes économiques pour les éleveurs et la filière bovine sud-coréenne. De plus, des prélèvements effectués lors de cette épidémie ont révélé que 67 % des animaux testés positifs étaient asymptomatiques (Chu et al., 2023), soulignant que le nombre de cas réels est probablement sous-estimé.

En 2024, une deuxième épidémie plus modérée est survenue, mais plus modérée avec seulement 24 cas recensés (Figure 2). Le premier cas rapporté concernait un animal non vacciné. Une enquête a révélé que les mesures de vaccination n'avaient pas été correctement respectées par certains élevages en 2023, ce qui a entraîné la réémergence de la maladie (Ra et al., 2024).

3. Modes de transmission et vecteur

3.1 Modes de transmission

La dynamique de diffusion de la DNC est étroitement liée aux différents modes de transmission possibles du virus. Le mode de transmission principal est vectoriel. Plusieurs études démontrent un lien important entre *Stomoxys calcitrans* et la diffusion de la dermatose nodulaire contagieuse (Issimov et al., 2020 ; Kahana-Sutin et al., 2017), dû notamment à sa présence abondante dans les élevages de bovins et ses repas sanguins passant d'animal à animal. Des infections expérimentales de Stomoxes ont montré que des particules virales infectantes peuvent persister dans les pièces buccales jusqu'à deux jours après un repas sanguin contaminant (Paslaru et al., 2021). D'autres vecteurs ont été identifiés, comme les moustiques *Aedes aegypti*, *Culex quinquefasciatus*, les culicoides *Culicoides nubeculosus* et les tabanidés *Heamatopota spp*, chez qui le virus peut persister jusqu'à plusieurs jours (Li et al., 2023 ; Sprygin et al., 2019). Cependant, à ce jour seuls *Aedes aegypti* et *Stomoxys spp* ont été identifiés comme étant compétents pour la transmission du virus (Chihota et al., 2001 ; Issimov et al., 2020), contrairement aux autres vecteurs.

Enfin, il a été démontré que le virus pouvait se transmettre par contact direct d'animal en animal (Aleksandr et al., 2020), une voie de transmission largement minoritaire selon la souche du virus et par certains vecteurs comme la tique dure (*Rhipicephalus* et *Amblyomma*) (EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015). Il a aussi été observé que la transmission pouvait se faire par voie intra-utérine ainsi que par les liquides séminaux, moins observée que la transmission vectorielle par *Stomoxys calcitrans*.

3.2 Stomoxys

Le genre stomoxe fait partie de la famille des Muscidae et comprend 18 espèces, dont douze sont endémiques d'Afrique, quatre en Asie et une (*S. sitiens*) est commune aux deux continents. Une autre espèce, *Stomoxys Calcitrans*, est quant à elle cosmopolite (Rochon et al., 2021). Les *S. Calcitrans* ont été identifiés comme vecteurs de plusieurs maladies animales dont la DNC (Butler et al., 1977). Cela entraîne indirectement d'importantes pertes économiques, mais également des pertes directes en raison de la douleur des piqûres lors des repas sanguins (Patra et al., 2018). Ces mouches peuvent être confondues avec les mouches de maison (*Musca domestica*). Elles font entre 4 mm et 7 mm de long et sont de couleur grise avec, sur leur abdomen rond, des points noirs et une ligne noire discontinue (Zumpt, 1973).

La mouche d'étable présente un cycle en 4 stades (œuf, larve, pupe, adulte). Les œufs éclosent en larve 12 à 24 h après la ponte dans des matières organiques en fermentation (Campbell, 2006 ; Meyer and Petersen, 1983 ; Simmons and Dove, 1941), avant de passer au stade pupe après 12 à 13 jours (à 27 °C), puis d'éclore en adulte environ 7 jours plus tard. Cependant, le cycle est influencé par la température et le substrat (Florez-Cuadros et al., 2019 ; Lysyk, 1998). Les adultes vivent de 2 à 4 semaines (Gilles et al., 2005 ; Killough and Mckinstry, 1965) et prennent leur premier repas sanguin 12 à 24 h après l'émergence. Les mâles sont fertiles dès le premier jour, les

femelles à 3-4 jours, ces dernières ne s'accouplent qu'une seule fois (Harris et al., 1966). Si les femelles peuvent théoriquement réaliser environ 100 cycles ovariens, seules 50 % complètent leur premier cycle et 25 % leur second (Beresford and Sutcliffe, 2012 ; Rochon et al., 2021).

Chez ces insectes, les deux sexes sont hématophages. Bien que la mouche puisse se passer de sang pour survivre en se contentant de repas à base de nectar, le sang est nécessaire pour la reproduction (Jones et al., 1992). La mouche se nourrit sur les bovins, chevaux et autres animaux au sang chaud. Il peut arriver qu'elle se nourrisse sur les humains, mais ce n'est généralement que lorsque le bétail est inaccessible (Duvall et al., 2023 ; Rochon et al., 2021). De préférence, la mouche se positionne sur les membres inférieurs, mais également au niveau des oreilles. Si la zone est inaccessible, le repas peut se faire sur le reste du corps de l'animal. Le repas dure 2 minutes à 4 minutes et environ 11 µl à 15 µl de sang y sont prélevés (Showler and Osbrink, 2015). Cependant, aucun anesthésiant n'est délivré, ce qui rend sa piqûre particulièrement douloureuse. Ainsi, l'insecte peut être chassé et reprendre son repas interrompu sur un autre animal. Le stomoxe peut alors être impliqué dans la transmission de virus comme celui de la DNC. Il peut se contaminer au cours d'un repas sanguin sur un animal infectieux et peut ensuite transmettre le virus lors d'un nouveau repas sur un animal naïf. La transmission se fait de manière mécanique, c'est-à-dire que le virus ne se réplique pas dans le vecteur. La fréquence de la prise de repas est température-dépendante, avec un repas par jour lors des périodes froides et jusqu'à deux à trois repas complets par jour pour les périodes chaudes (Berry and Campbell, 1985 ; Harris et al., 1974).

La température et l'humidité sont des facteurs qui impactent les populations de *S. calcitrans* (Taylor et al., 2017). Les températures d'activité idéales de *Stomoxys Calcitrans* sont comprises entre 15°C et 35°C. Au-delà de cette plage, on observe une baisse du nombre d'individus (Jacquiet et al., 2014 ; Mullens and Peterson, 2005 ; Taylor et al., 2007). Ainsi, dans les régions tempérées, des pics d'activité peuvent être observés au début et à la fin de l'été. Pour les régions plus froides, ce pic est en milieu d'été. Inversement, dans les régions chaudes, les pics sont observés en fin d'hiver et au printemps (Rochon et al., 2021). Les précipitations ont également un rôle important dans la biologie de cet insecte, en humidifiant les substrats et milieux favorisant la ponte et le développement larvaire (Mullens and Peterson, 2005).

S. Calcitrans se déplace principalement sur de courtes distances autour des animaux, bien que des dispersions beaucoup plus longues soient possibles dans des conditions particulières. Des études en laboratoire sur tapis de vol ont montré que les mouches pouvaient parcourir 29km en 24 h (Bailey et al., 1973). Dans l'environnement, il a été observé qu'elles pouvaient parcourir 8km en moins de 2 h (Eddy et al., 1962). Le vol serait plutôt proche du sol, entre 30 cm et 1,2 m, bien que certains individus puissent être trouvés jusqu'à 8,5 m de haut (Williams and Rogers, 1976). Une autre étude a démontré que cette mouche pouvait avoir un périmètre de vol jusqu'à 225 km en quelques jours (Hogsette and Ruff, 1985), mais ce comportement semble être des cas peu

répandus dans le comportement semble peu répandu au sein de l'espèce et est surtout observé lors d'événements liés à des conditions météorologiques, tel que de forts vents, au cours desquels l'insecte serait aspiré et porté sur de longues distances.

4. Modélisation

4.1 Intérêt, apport, utilisation

Les mécanismes de diffusion de la dermatose nodulaire contagieuse sont divers et varient en fonction du territoire et de la période étudiée. Leur étude peut s'avérer difficile car ils résultent de l'interaction de nombreux facteurs tels que les animaux, la biologie des vecteurs et l'environnement. Ces processus peuvent être rapides et difficilement anticipables. Dans ce cadre, l'utilisation de la modélisation permet de rassembler un grand nombre d'informations dans un même cadre, d'observer leurs interactions et d'explorer des situations parfois non observables directement sur le terrain (Lee et al., 2024). Elle permet également de tester différents scénarios en fonction de critères ou de situations pré-définies, ce qui aide à mieux comprendre ou anticiper les mécanismes de propagation ou d'en estimer les niveaux de risques dans l'espace et dans le temps (Bibard et al., 2025 ; Farra et al., 2022).

Dans ce contexte, les approches multicritères comme les MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) s'avèrent utiles. Cette méthode permet d'associer plusieurs sources d'information, comme plusieurs voies de risque, dans une même analyse. Lors de l'association des différentes voies, il leur est attribué un poids relatif, reflétant leur importance relative dans le contexte de l'étude pour le risque considéré. L'objectif est ainsi de produire une évaluation globale et spatiale du risque (Fusade-Boyer et al., 2020 ; Sanogo et al., 2024), afin de répartir les efforts de surveillance et de gestion.

4.2 Facteurs de risques

Les voies d'introduction et de diffusion de la DNC ont fait l'objet de nombreux travaux, mettant en évidence leur multiplicité et complémentarité, afin d'identifier les zones à risque.

4.2.1 Risque d'introduction

Concernant l'introduction dans un pays indemne, le mouvement de bovins infectés est reconnu comme un facteur de diffusion à longue distance important, notamment via les importations légales ou illégales depuis des zones infectées (EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015 ; Saegerman et al., 2019, 2018). Cependant, cette voie ne suffit pas à expliquer l'ensemble des introductions observées. En Israël, des cas ont ainsi été répertoriés à 80–200 km d'un foyer actif en Égypte, en l'absence de tout mouvement d'animaux documenté (Yeruham et al., 1995). Ces observations suggèrent que des vecteurs infectés peuvent être transportés passivement par les vents sur de longues distances, constituant ainsi une voie d'introduction indépendante des flux commerciaux. Par ailleurs, l'introduction de vecteurs infectés via le transport d'animaux, bovins ou autres, représente une troisième voie à considérer. En effet, en l'absence de mesures préventives adéquates, certains stomoxes infectés peuvent rester sur

l'animal lorsqu'il est déplacé ou transporté (Bianchini et al., 2023). Bien que la succession des événements nécessaires à sa réalisation la rende moins probable (survie du stomoxes, conservation du virus, contamination d'un nouvel animal à l'arrivée), le risque associé n'est pas négligeable (Farra et al., 2022 ; Paslaru et al., 2021 ; Saegerman et al., 2018).

4.2.2 Risque de diffusion

La diffusion sur un territoire touché suit une logique similaire, mais à une échelle différente. Les déplacements d'animaux entre élevages, vers les marchés ou les abattoirs, constituent un facteur de propagation à moyenne distance (EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015). En parallèle, les stomoxes assurent une diffusion à courte distance entre élevages voisins, d'autant que leur comportement alimentaire à favorise la transmission mécanique (Issimov et al., 2020; Kahana-Sutin et al., 2017). Cette diffusion vectorielle est liée aux conditions climatiques : la température et l'humidité influencent directement l'abondance et l'activité des vecteurs, ce qui se traduit par une saisonnalité des foyers dans plusieurs régions du monde (Gari et al., 2010 ; Li et al., 2023 ; Mulatu and Feyisa, 2018). Enfin, la densité de bovins dans une zone donnée constitue un facteur de risque, en augmentant à la fois la probabilité de contact entre animaux et la disponibilité des hôtes pour les vecteurs (Li et al., 2023).

5. Objectif et plan de l'étude

L'APQA (Animal and Plant Quarantine Agency), institut gouvernemental sud-coréen assurant la protection zoosanitaire et phytosanitaire nationale (inspection aux frontières, diagnostic, épidémiosurveillance et laboratoire de référence WOA), cherche à renforcer sa lutte contre les maladies vectorielles, et notamment à développer une meilleure gestion et surveillance. Pour cela, une convention de collaboration scientifique a été établie avec l'ENVT. L'objectif est d'évaluer et développer des outils d'évaluation du risque pour les maladies vectorielles, dans le but de développer une surveillance et une gestion basées sur le risque.

Ce projet se focalise sur la dermatose nodulaire contagieuse avec la création de cartes de risque d'introduction dans le pays et de diffusion au sein du pays de la dermatose nodulaire contagieuse, afin de permettre une anticipation des futures épidémies potentielles et une réaction la plus rapide et efficace possible en cas de réémergence de la maladie. Pour ce faire, dans un premier temps, les principales voies d'introduction en Corée, puis de diffusion au sein du pays ont été identifiées. Pour chacune de ces voies, un travail d'analyse de données pertinentes collectées auprès de notre partenaire coréen a été conduit afin d'évaluer la distribution relative du risque d'introduction ou de diffusion sur le territoire coréen à chaque voie. Puis, après cartographie du risque pour chaque voie, les cartes finales ont été créées en combinant les différentes voies identifiées, pondérées selon leur importance d'après une consultation d'experts.

Matériels et Méthodes

Dans cette étude, une approche d'analyse multi-critère basée sur un système d'information géographique (SIG) a été appliquée pour cartographier le risque d'introduction et de diffusion de la dermatose nodulaire contagieuse en Corée du Sud. Elle a été réalisée en cinq étapes principales : (1) identification des voies d'introduction/diffusion de la dermatose dans le pays. (2) collecte de données pour chacune des voies, traitement, standardisation et création de cartes de risque. (3) détermination des poids relatifs de chacune des voies par une élicitation d'experts. (4) création des cartes finales de risque en combinant et pondérant des cartes des différentes voies. (5) analyse de sensibilité en testant différents poids et en comparant aux données de la première épidémie de DNC en Corée du Sud.

1. Voies d'introduction et diffusion de la DNC

Pour identifier les différentes voies d'introduction et de diffusion, une étude bibliographique a été réalisée. Trois principales voies d'introduction de DNC en Corée du Sud ont été identifiées, et cinq voies de diffusion de la maladie entre les districts du pays (Figure 3).

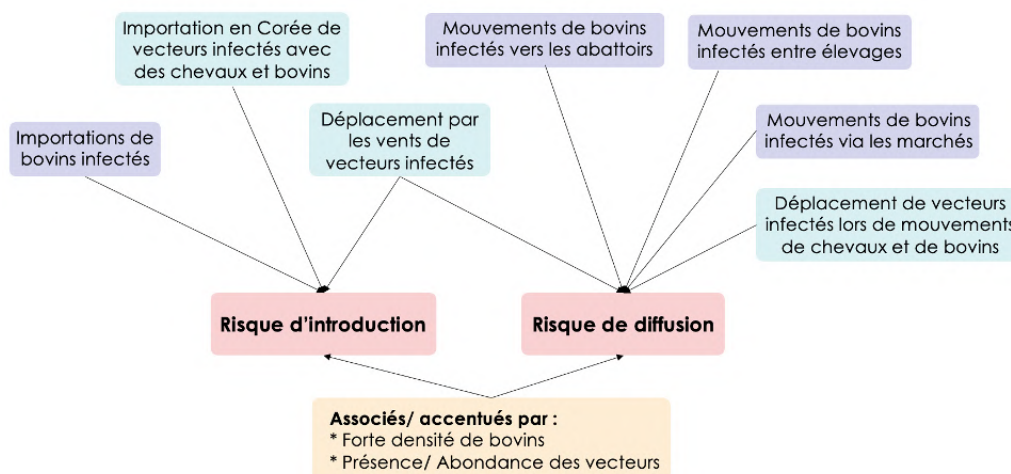


Figure 3 : Schéma des principales voies identifiées d'introduction et de diffusion de la dermatose nodulaire contagieuse en Corée du Sud.

2. Données

Plusieurs jeux de données de différentes sources ont été utilisés pour cette étude.

2.1 Données fournies par l'APQA

Les données de distribution des élevages de bovins et de chevaux ont été fournies par l'Animal Plant Quarantine Agency de Corée du Sud (APQA). Les données regroupent le type de bétail, le nombre de bovins ou chevaux qui s'y trouvent, les coordonnées de localisation des fermes et l'adresse précise.

Des données relatives à l'importation de bovins et de chevaux dans le pays ont également été récupérées, incluant la date d'arrivée, le pays d'origine, l'espèce, le mode de transport, l'aéroport

d'arrivée, le nombre d'animaux transportés et les coordonnées des fermes ou lieux ayant importé les animaux.

Des données sur les différents cas de dermatose nodulaire contagieuse répertoriés dans le pays pour les épidémies en 2023 et 2024 ont été analysées. Ces jeux de données répertorient les signes cliniques observés, l'élevage (nombre d'animaux, nom de l'éleveur et de la ferme, coordonnées et adresse de la ferme), la date d'émergence de la maladie, la date d'infection estimée, ainsi que les mesures mises en place avec la date de vaccination et d'abattage.

Des données sur le transport de chevaux et de bovins vers les abattoirs ont aussi été fournies. On pouvait y retrouver le type de bétail, la date de transport, les coordonnées de départ et d'arrivée et le nombre d'animaux transportés.

Enfin, un dernier jeu de données a été collecté sur les marchés de bovins vivants dans le pays. Il y regroupe toutes les informations de localisation mais aussi le nombre de bovins qui y sont échangés sur l'année 2025.

2.2 Données mondiales de densité de bovins

Les données de distribution et de densité des bovins à l'échelle mondiale ont été obtenues depuis le site FAO Livestock System¹. La dernière version GLW4 de l'année 2020 a été utilisée, comprenant plusieurs systèmes d'élevage comme les poulets, les canards, les chevaux, les porcs, les buffles, les bovins, les moutons et les chèvres. Ici, seules les données liées aux bovins et aux buffles ont été utilisées. Ces couches contiennent la densité des animaux par km², avec un poids estimé par un modèle Random Forest et comprennent une résolution de 5 minutes d'arc (soit environ 10 km² à l'équateur) (Gilbert et al., 2018).

2.3 Données météorologiques

L'activité, la survie et la répartition des insectes vecteurs, notamment *Stomoxys calcitrans*, sont fortement influencées par les facteurs environnementaux. Afin de pouvoir estimer leur présence, des données climatiques ont été extraites de la base de données WorldClim version 2.1 (Fick and Hijmans, 2017), comprenant la température maximale (°C), la température minimale (°C) et les précipitations (mm). Les données sont disponibles à l'échelle mondiale avec une résolution spatiale de 2,5 minutes d'arc ($\approx 21 \text{ km}^2$ à l'équateur). Les couches climatiques pour la période 2020–2024 ont été téléchargées. Un découpage spatial a ensuite été réalisé afin de restreindre l'analyse à la zone d'étude correspondant à la Corée du Sud. Pour chaque variable, les moyennes mensuelles ont été calculées avec le logiciel R version 4.4.3, sur l'ensemble des années disponibles (2020–2024) afin d'obtenir des valeurs climatiques représentatives de la période étudiée. Les données sont réparties au format GeoTiff, à raison d'un fichier par variable, par mois et par année.

¹ <https://data.apps.fao.org/catalog//iso/9d1e149b-d63f-4213-978b-317a8eb42d02>

3. Modélisation de la dispersion vectorielle

Les stomoxes pouvant se disperser aussi bien par leurs propres déplacements que passivement par le vent, deux approches de modélisation ont été utilisées afin d'estimer le risque lié aux déplacements de vecteurs infectés, selon que la dispersion considérée est à longue et à courte distance.

3.1 Longue distance

Pour la dispersion à longue distance, la modélisation des trajectoires de vols passifs par les vents a été utilisée. Cet outil a d'ailleurs déjà été utilisé pour répondre à des questions sur les voies d'entrée et de diffusion de la maladie (Bibard et al., 2024). Pour ce faire, dans un premier temps, la littérature a été consultée afin de déterminer les paramètres biologiques de vol. Il a alors été défini une durée de vol maximale de 48 h et une hauteur de trajectoire ne dépassant pas 100 m.

Pour réaliser la modélisation, Tropolink a été utilisé. Cet outil développé par l'unité de recherche INRAE BioSP (Richard et al., 2023), combine des modèles de trajectoires atmosphériques avec des méthodes d'analyse de réseaux, offrant ainsi l'étude de la dispersion aéroportée des vecteurs, notamment à de longues distances. L'approche est basée sur la modélisation des trajectoires de masses d'air, calculées par l'algorithme HYSPLIT v5.4.0 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Il peut alors être identifié des liens directionnels entre régions, traduisant un potentiel de transfert de vecteurs et, par conséquent, un risque d'introduction de la maladie.

Cette modélisation s'est déroulée en deux temps, avec une première analyse menée en backward puis une deuxième en forward.

3.1.1 Backward

Cette première modélisation sert à identifier les potentielles zones sources de vecteurs infectés, afin de valider l'hypothèse d'une introduction de vecteurs par les vents. Pour cela, les six premiers cas de dermatose nodulaire contagieuse ont été choisis comme point d'arrivée de l'analyse. Puis, il a été choisi un temps de -48 h. Le logiciel remonte alors dans le temps pour identifier les trajectoires arrivant à ces points d'arrivée. Les trajectoires ont ensuite été filtrées pour exclure celles dont les points de départ sont incohérents (par exemple au milieu de l'eau) et dont l'altitude est supérieure à la couche planétaire, ce qui rendrait la survie des vecteurs impossible. Enfin, les points de départ possibles sont extraits et analysés au regard de notre connaissance de la situation de la DNC en 2023.

3.1.2 Forward

Cette deuxième analyse vise à identifier les districts à risque d'introduction de vecteurs infectés transportés par le vent. Pour cela, le logiciel calcule les trajectoires depuis des points de départ choisis. Pour définir ces points, il a été créé une grille de 0.25° par 0.25° (soit environ 25km x 25km) sur la zone d'intérêt (dans un cadre autour de la Corée comprenant la Chine et le Japon et la Corée du Nord). Les cases se situant dans l'eau ont été exclues. Puis, pour chacune des cases,

les barycentres ont été créés. Pour les points se situant en Chine et au Japon, il n'a été conservé que ceux présentant une densité de bovins supérieure à 10 têtes/km², considérés comme des points possibles de présence de la DNC. Pour la Corée du Nord, il a été choisi de ne pas filtrer les points, et de conserver ceux de l'entièreté du pays en raison du manque d'information sur la densité de bovins. Puis, chaque barycentre a servi de point de départ pour les trajectoires. Ces trajectoires ont été modélisées avec une durée de maximum +48 h. Il n'a ensuite été conservé que les trajectoires arrivant en Corée du Sud.

Cette modélisation a été lancée sur tous les jours de tous les mois à partir du 1er janvier 2020 jusqu'au 31 décembre 2025, afin d'obtenir une liste aussi exhaustive que possible des points d'arrivée potentiels. Pour chaque jour, les trajectoires ont été lancées avec des départs toutes les 6 h (00 h, 6 h, 12 h, 18 h heure locale, UTC+9).

3.2 Courte distance

La Corée du Sud, étant un territoire de taille limitée et les stomoxes ayant un comportement majoritairement sédentaire et un périmètre de vol actif plutôt restreint (Showler and Osbrink, 2015), une modélisation Tropolink n'était pas adaptée pour la diffusion du vecteur dans le pays. Il a alors été choisi de réaliser une modélisation isotrope (indépendante des vents) en créant un périmètre de 20km autour de chaque district, ce qui correspond à la distance maximale de vol actif supposée des stomoxes (Bailey et al., 1973). La surface de chaque district voisin comprise dans ce périmètre a ensuite été utilisée comme proxy du risque relatif de dispersion vectorielle à courte distance entre la paire de districts testés.

4. Modélisation des transports

4.1 Transports entre les fermes des districts

N'ayant pas la possibilité d'obtenir des données sur le transport d'animaux, un modèle de gravité a été utilisé pour estimer des flux hypothétiques entre les districts. Ce modèle est inspiré de la loi de gravitation de Newton et a été utilisé la première fois pour décrire des mouvements de population, par Zipf en 1946. Il a proposé l'hypothèse selon laquelle le flux de population entre deux villes peut être expliqué par la taille de la population dans chaque district et la distance qui les relie et que ces facteurs sont reliés par une fonction de gravité. Ainsi, le modèle de gravité utilisé dans cette étude a été construit suivant la formule :

$$F_{ij} = \frac{M_i M_j}{D_{ij}}$$

où, F_{ij} est le flux potentiel entre les districts i et j , M_i et M_j , sont les masses des districts i et j , c'est-à-dire le nombre d'élevages dans chacun. D_{ij} est la distance entre les barycentres des deux districts. Le flux potentiel de bovins et de chevaux a été estimé pour chaque paire de districts.

4.2 Transports liés aux marchés

Pour estimer le flux de bovins lié à la présence et à la taille des marchés de bovins vivants, un modèle de gravité a été créé sur le même principe que celui créé pour le transport entre les fermes, en prenant en compte la présence d'un marché, sa taille, la densité d'élevages dans les districts voisins et la distance qui sépare les deux districts. Ce modèle permet ainsi d'obtenir, pour chaque paire de districts, une matrice de flux reflétant les échanges potentiels liés aux échanges de marchés de bovins vivants.

4.3 Transports vers les abattoirs

Contrairement aux autres transports, nous avons ici un jeu de données contenant le nombre de bovins et chevaux déplacés, avec leurs districts de départ et la localisation de l'abattoir d'arrivée, pour la période du 3 janvier 2021 au 7 janvier 2026.

4.4 Transports des vecteurs avec le transport d'animaux

Le transport de vecteurs infectés via les mouvements de chevaux entre élevages constitue une voie potentielle de diffusion supplémentaire. Étant donné l'absence de données précises concernant les déplacements de chevaux entre districts, un modèle de gravité a été utilisé dans la même logique que celui des mouvements de bovins. Il prend en compte le nombre de fermes de chevaux entre deux districts et la distance qui les sépare.

5. Score d'abondance du vecteur :

Comme décrit dans l'introduction, les conditions météorologiques ont un impact significatif sur l'activité et l'abondance des stomoxes. En l'absence de données sur l'abondance de vecteurs par districts, un score de comptabilité à la survie des vecteurs basé sur les données météo de la Corée du Sud a été calculé. D'après une étude de Taylor et al. de 2017, les températures de survie des vecteurs sont comprises entre 15°C et 35°C, en dehors desquelles l'activité du vecteur est observée comme nulle ou quasiment nulle. Enfin, il a été démontré que la précipitation joue un rôle important dans le développement de l'insecte. Cependant, l'humidité observée en Corée du Sud est suffisante pour l'activité du vecteur, sans pour autant que sa variation n'ait d'impact significatif. De plus, en Corée du Sud, les précipitations sont présentes tout au long de l'année, ainsi les précipitations sont exclues du calcul. Pour estimer les conditions favorables, la proportion de la période propice de température mensuelle, pour chaque pixel du fichier raster est calculée suivant la formule :

$$a = (T_{\max \text{ opt ou } T_{\max}}) - (T_{\min \text{ opt ou } T_{\min}})$$

$$y = T_{\max} - T_{\min}$$

$$F_T(T) = a/y$$

Où, a est l'intersection entre la plage optimale du vecteur et la plage de températures du district, y est la plage de températures moyennes mensuelles observées dans un district donné, $T_{\max}$ et $T_{\min}$

sont les températures mensuelles moyennes maximales et minimales et $F_T(T)$ proportion de la période propice de température mensuelle. À partir des variations climatiques mensuelles, deux périodes ont été définies : une période de forte activité du vecteur (mars–octobre) et une période de faible activité (novembre–avril). Pour chaque période, les scores mensuels sont calculés à l'échelle du pixel, puis moyennés à l'échelle du district. Chaque district obtient ainsi un score de compatibilité vectorielle compris entre 0 et 1 pour chaque période.

6. Consultation d'experts et pondération des voies

Pour estimer la contribution relative des différentes voies d'introduction et de diffusion, une consultation d'experts a été réalisée. Neuf experts ont été contactés avec différents domaines d'expertise, incluant trois experts français et six experts sud-coréens, possédant une expertise soit sur les poxvirus soit en entomologie sur le vecteur *Stomoxys calcitrans*. Dans un premier temps, un document résumant le contexte de transmission en Corée du Sud ainsi que des informations détaillées sur l'inclusion de chacune des voies leur ont été envoyés (Annexe 1), ainsi qu'un questionnaire développé sur un FramaForm (<https://framaforms.org/abc/fr/>) pour pondérer le risque de chaque voie (Annexe 2). Le questionnaire se composait de trois parties correspondant à deux scénarios d'introduction (scénario 1 : Chine et Japon rapportent des foyers de DNC et la situation de la Corée du Nord est inconnue / Scénario 2 : seule la Chine rapporte des foyers, le Japon est indemne et la situation reste inconnue pour la Corée du Nord), et une dernière partie pour la diffusion. Pour le risque d'introduction, les experts devaient imaginer 100 introductions de la DNC en Corée du Sud et les répartir entre les différentes voies selon leur estimation de la vraisemblance de chacune. Pour le risque de diffusion, le même principe était appliqué avec 100 événements de diffusion depuis un district infecté vers les autres districts du pays. Enfin, le niveau de confiance était évalué par trois catégories (Incertitude élevée, moyenne et faible), pour l'introduction et la diffusion séparément, afin de pondérer les réponses de chaque expert par son niveau d'incertitude. Finalement, le poids de chaque voie était déterminé par la moyenne des réponses de chaque expert pondérées par son niveau d'incertitude (Annexe 3).

7. Géotraitement et génération des cartes

Dans le but de combiner les différentes voies d'introduction ou de diffusion, le score de chaque district a été normalisé par une division par la valeur maximale de la voie pour obtenir des valeurs comprises entre 0 et 1. Puis, les 3 cartes de risque brutes (introduction scénario 1, introduction scénario 2, diffusion) ont été générées en réalisant une moyenne des scores des différentes voies, pondérée grâce aux poids estimés grâce à l'éllicitation d'experts. Ensuite, ces cartes de risque brutes sont transformées en valeurs qualitatives, en utilisant un découpage par intervalle égal en 5 catégories de risque (très faible, faible, modéré, élevé, très élevé). Pour les cartes d'introduction, les bornes des intervalles ont été définies à partir de la valeur maximale observée sur les deux scénarios, afin de garantir leur comparabilité. Pour les cartes de diffusion, ces bornes ont été définies à partir de la valeur maximale observée sur l'ensemble des 229 cartes. La classification qualitative du risque final a été réalisée en combinant le score de risque

d'introduction et de diffusion avec la densité de bovins par district, selon les consignes de l'OIE et la matrice de risque proposée par le Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (CDC, 2026 ; OIE, 2010)(Annexe 4). Cette approche permet de pondérer le risque d'introduction par la présence d'hôtes réceptifs, condition nécessaire à l'établissement d'un foyer clinique de DNC. Ceci a abouti aux cartes de risque dites finales, visualisées à l'aide du logiciel QGIS version 3.40.5-Bratislava (<http://www.qgis.org/>).

8. Analyse de sensibilité

Pour tester la robustesse du modèle et évaluer l'impact de l'éllicitation d'experts sur les résultats finaux, une analyse de sensibilité a été effectuée en suivant la méthode présentée en Annexe 5.

Résultats

1. Risque par voie d'introduction et de diffusion

Pour chaque voie, des cartes de risques individuelles ont été créées grâce aux données obtenues.

1.1 Risque d'introduction

Pour chaque voie d'introduction, il est obtenu un tableau regroupant les identifiants, les noms et les données spatiales de chaque district, ainsi que le score de risque associé (allant de 0 à 1) pour chaque voie.

Concernant l'introduction du virus par le vent, l'analyse *backward* a révélé que les trajectoires associées aux six premiers foyers coréens de 2023 étaient compatibles avec une origine en Corée du Nord ou en Chine. Ceci est en adéquation avec la situation épidémiologique de ces pays à cette période, puisque des foyers de DNC étaient recensés en Chine à la même période que ceux recensés en Corée. Leur localisation précise n'étant pas disponible, il n'a pas été possible d'aller plus loin dans cette piste. L'analyse *forward* permet quant à elle d'identifier les districts les plus exposés selon le pays source, et ainsi de spatialiser ce risque sur l'ensemble du territoire. Une différence spatiale est observée selon le pays source. Les districts du Nord présentent les scores les plus élevés pour les trajectoires en provenance de Corée du Nord, ceux de l'ouest pour des introductions en provenance de la Chine et enfin les districts du sud pour des introductions en provenance du Japon (Annexe 6).

S'agissant des importations de bovins, seuls trois districts présentent un score de risque non nul, reflétant la concentration géographique des importations de bovins coréens à certains districts (Annexe 7). En revanche, le risque lié à l'introduction de vecteurs infectés liés à l'import de chevaux concerne un nombre plus large de districts (n=51), traduisant la distribution plus diffuse des importations équines sur le territoire (Annexe 7).

1.2 Risque de diffusion

Pour chaque voie de diffusion, une matrice de scores normalisés (0–1) a été calculée, associant à chaque paire de districts (A, B) un score reflétant le risque de diffusion de A vers B (Annexe 8).

La distribution des scores pour chaque voie de diffusion est caractérisée par une majorité de paires de districts présentant un score égal ou proche de 0, et un faible nombre de paires avec des valeurs plus hautes. Ces résultats reflètent des flux importants concentrés entre un nombre limité de districts, généralement ceux géographiquement proches et présentant une forte densité de fermes (Figure 4).

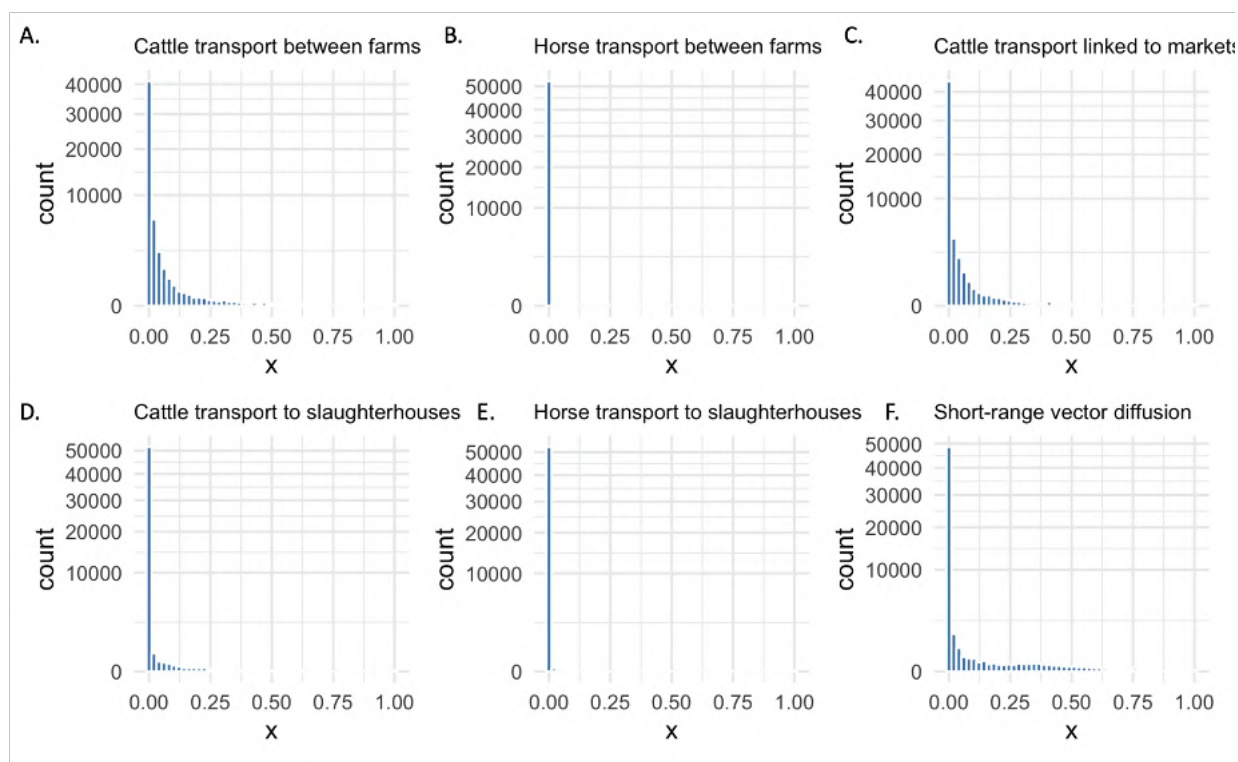


Figure 4: Histogrammes des scores de risques pour chaque voie de diffusion

A. Histogramme des scores du risque de diffusion via le transport de bovins entre les fermes. **B.** Histogramme des scores du risque de diffusion via les vecteurs déplacés avec les chevaux transportés entre les fermes. **C.** Histogramme des scores du risque de diffusion via le transport de bovins lié aux marchés. **D.** Histogramme des scores du risque de diffusion via le transport de bovins vers les abattoirs. **E.** Histogramme des scores du risque de diffusion via les vecteurs déplacés avec les chevaux transportés vers les abattoirs. **F.** Histogramme des scores du risque de diffusion via le vol à courte distance de vecteurs.

1.3 Compatibilité du district

Concernant le score de compatibilité climatique vectorielle, une très faible variabilité inter-districts est observée, avec des valeurs comprises entre 0,01 et 0,10 en période de basse activité et entre 0,70 et 0,90 en période de haute activité (Annexe 9). Ces résultats ont conduit à ne pas intégrer ce score directement dans les cartes finales. Il est néanmoins retenu que le risque d'introduction et de diffusion de la DNC est globalement plus élevé en période de forte activité vectorielle (mars–octobre) et moindre en période de faible activité (novembre–avril).

La densité de bovins par district présente quant à elle une variabilité spatiale plus marquée (Annexe 10). Les districts à forte densité se concentrent principalement dans le centre et l'ouest du pays, tandis que les districts du nord et de l'extrême sud présentent des densités plus faibles.

2. Élicitation d'experts

Sur les neuf experts sollicités, huit ont répondu à l'ensemble du questionnaire. Les réponses de deux experts sud-coréens ne respectant pas les consignes de répartition (la somme des points attribués aux différentes voies ne totalisant pas 100) ont été écartées, afin d'éviter tout biais lié à une mauvaise compréhension du protocole. L'analyse comprend donc les réponses de six experts.

Les réponses relatives aux voies d'introduction se sont révélées fortement hétérogènes entre les experts dans les deux scénarios. Deux experts ont identifié l'importation de bovins infectés comme voie prépondérante, tandis que les quatre autres ont attribué les poids les plus élevés à l'introduction par dispersion aéroportée de vecteurs infectés. Cette divergence se traduit par une variabilité inter-experts importante, illustrée par exemple par des poids variant de 1 à 90 pour la voie d'importation de bovins (Annexe 11, Figure 5A et 5B). En revanche, une meilleure convergence est observée pour les voies de diffusion, avec des écarts-types sensiblement plus faibles (Figure 5C). Les niveaux d'incertitude déclarés par les experts suivent le même gradient : majoritairement élevés pour les questions d'introduction, ils sont plus modérés pour celles portant sur la diffusion (Annexe 11). Les poids finaux calculés sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

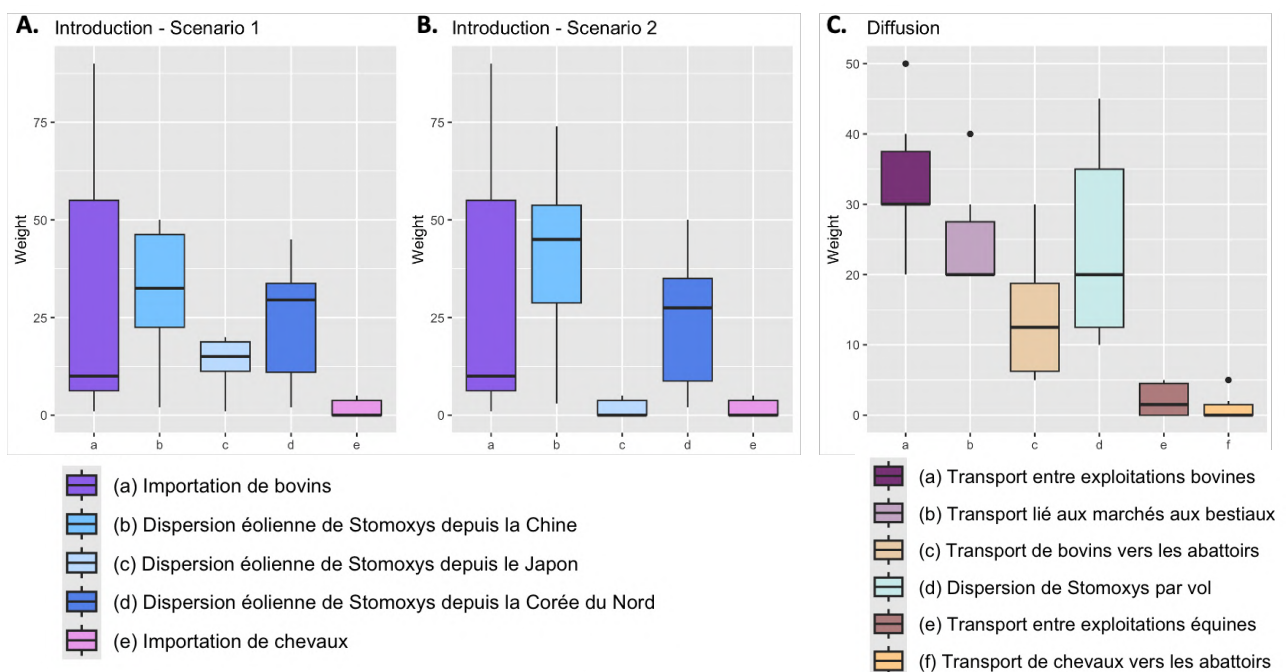


Figure 5 : Boxplot des poids obtenus lors de l'élicitation d'experts

A. Boxplot des poids pour le scénario 1 d'introduction. **B.** Boxplot des poids pour le scénario 2 d'introduction. **C.** Boxplot des poids pour les voies de diffusion.

Suite à la mise en commun des opinions d'experts, la voie identifiée la plus à risque est l'import de bovins avec un poids de 34.63 ± 41.96 suivie par les vecteurs infectés aéroportés depuis la Chine avec un poids de 29.25 ± 21.26 (tableau 1) pour le risque d'introduction, dans la situation où la Chine et le Japon déclarent des cas (scénario 1). Pour le scénario où seule la Chine déclarerait des cas (scénario 2), on retrouve ces deux voies comme les plus à risque avec respectivement 30.89 ± 41.22 et 44.22 ± 29.66 .

Tableau 1 : Poids calculé pour les voies d'introduction de la DNC en Corée du Sud

Risque d'introduction	Scénario 1		Scénario 2	
	Poids	Ecart	Poids	Ecart
Import de bovins infectés et de leurs vecteurs	34.625	41.957	30.889	41.216
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance de Chine	29.250	21.261	44.222	29.655
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance du Japon	12.125	8.224	2.222	2.722
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance de Corée du Nord	22.125	17.098	21.000	17.181
Transport de vecteurs infectés avec l'import de chevaux	1.875	2.652	1.667	2.582

Le tableau 2 résume les poids calculés pour les voies de diffusion de la DNC en Corée du Sud. Le transport de bovins entre les fermes a été identifié comme la voie de diffusion la plus importante dans la diffusion (33.00 ± 11.01). Les transports de bovins liés aux marchés et les déplacements des vecteurs à courte distance suivent, avec un même poids de 24.00 (et des écarts-types respectifs de 7.29 et 14.66).

Tableau 2 : Poids calculés pour les voies de diffusion de la DNC en Corée du Sud

Risque de diffusion	Poids	Ecart type
Transport de bovins entre les fermes	33.000	11.009
Transport de bovins liés aux marchés	24.000	7.266
Transport de bovins vers les abattoirs	15.500	9.935
Diffusion des vecteurs à courte distance	24.000	14.656
Transport des vecteurs avec les chevaux entre les fermes	2.100	2.422
Transport des vecteurs avec les chevaux vers les abattoirs	1.400	2.147

3. Cartes brutes de risque

À l'issue de l'éllicitation d'experts, des cartes de risque brutes ont été produites : deux cartes de risque d'introduction correspondant aux scénarios 1 et 2, et une carte de risque de diffusion par district source, soit 229 cartes au total.

3.1 Cartes brutes du risque d'introduction

Pour le scénario 1, les districts présentant les niveaux de risque les plus élevés se concentrent principalement dans le nord-ouest du pays et le long de la côte ouest, reflétant la combinaison d'un risque élevé d'introduction par le vent depuis la Chine et de l'importation de bovins (Annexe 12).

Pour le scénario 2, en l'absence de foyers au Japon, la distribution spatiale du risque se recentre nettement sur le nord et l'ouest du pays (Annexe 12). La disparition du risque lié aux trajectoires en provenance du Japon se traduit par une réduction du risque dans les districts du sud (passant par exemple de 0,13 à 0,03 pour le district 46770), ainsi que par une augmentation du score de risque des districts de l'ouest (passant par exemple de 0,35 à 0,49 pour le district 44270).

Les deux scénarios se distinguent également par leur distribution globale des scores. Dans le scénario 2, la suppression de la voie d'introduction en provenance du Japon conduit à une redistribution des poids entre les voies restantes, augmentant le poids attribué à la voie d'introduction depuis la Chine. Cela se traduit par des scores globalement plus élevés dans les districts de l'ouest et du nord, avec un score maximal passant de 0,37 en scénario 1 à 0,49 en scénario 2.

3.2 Carte brute du risque de diffusion

Le risque de diffusion est calculé pour chaque district source, résultant en 229 cartes produites. Afin de visualiser ces résultats, deux cartes sont présentées à titre d'exemple (Annexe 13). La première carte représente le district présentant le score moyen de diffusion le plus élevé (district 52140), dont le risque de diffusion est élevé dans les districts environnants, avec des scores compris entre 0 et 0,23. La deuxième carte représente le district du premier foyer déclaré lors de l'épidémie de 2023 (district 44270), dont le profil de diffusion est nettement plus limité, avec une majorité de districts présentant un score de 0 à 0,06 et quelques districts du centre-ouest atteignant 0,09–0,16. De manière générale, les scores de diffusion restent faibles, avec une grande majorité de paires de districts présentant un score nul ou proche de zéro.

4. Analyse de sensibilité

4.1 Analyse de sensibilité de l'introduction

L'analyse de sensibilité du scénario 1 montre une robustesse globale satisfaisante du classement des districts (Figure 6). Sur les vingt districts les plus à risque dans le classement de base, dix maintiennent systématiquement leur position quelle que soit la variation de pondération testée (± 1 écart-type par voie, Annexe 5). Parmi les dix premiers, neuf présentent une bonne stabilité, avec un rang maximal inférieur à 17 dans l'ensemble des scénarios testés. Le district 41800, premier du classement initial, ne descend pas en dessous de la onzième place dans aucun des scénarios. Deux districts font exception : 42760 (rang initial 3) et 11470 (rang initial 11), dont le classement peut atteindre le rang 229 selon les pondérations appliquées. Ces deux districts correspondent à deux des trois seuls districts importateurs de bovins du pays, et leur classement dépend donc

quasi exclusivement du poids attribué à cette voie, précisément celle sur laquelle le désaccord entre experts est le plus marqué. Les districts classés entre les rangs 12 et 20 présentent quant à eux une instabilité modérée à élevée.

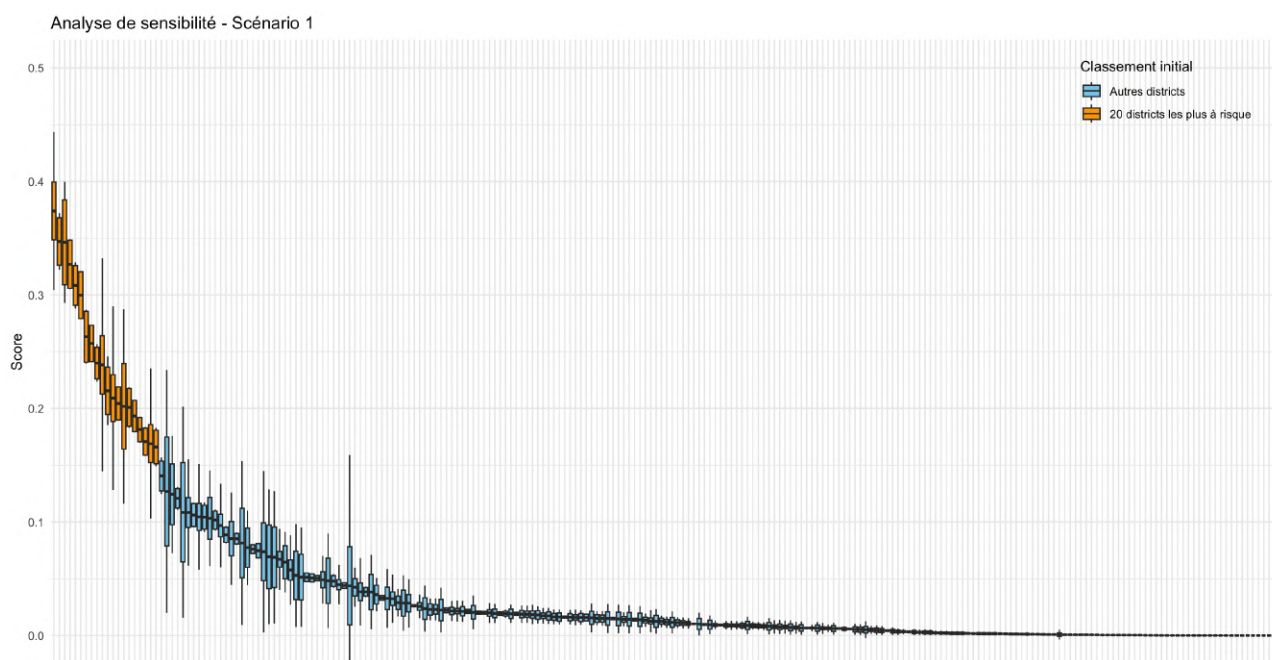


Figure 6 : Score de risque des districts après analyse de sensibilité pour le scénario 1.

En jaune sont représentés les 20 districts les plus à risque de la carte de risque de base. En bleu sont les autres districts.

Dans le scénario 2, la robustesse est encore plus marquée (Annexe 5). Dix districts sur vingt maintiennent systématiquement leur position, avec une stabilité particulièrement forte sur les neuf premiers. Le district 44270 est le plus stable de ce scénario, avec un rang variant entre 1 et 5. Le district 41800, premier en scénario 1, recule à la cinquième place mais reste stable, ne descendant pas sous le rang 11. Le district 42760 présente à nouveau une instabilité extrême, confirmant que celle-ci est liée uniquement à l'incertitude sur la voie d'importation de bovins, indépendamment du scénario épidémiologique considéré.

4.2 Analyse de sensibilité des cartes de diffusion

L'analyse de sensibilité de la diffusion a été réalisée pour deux districts sources (52140 et 44270). Pour le district 52140, 14 des 20 districts de destination les plus à risque maintiennent systématiquement leur position dans le top 20 quelle que soit la variation de pondération testée (Figure 7, Annexe 5). Les trois premiers districts de destination présentent une stabilité particulièrement forte, avec un rang maximal inférieur à 7. Deux districts font exception : 41170 (rang initial 7, rang maximal = 21) et 46900 (rang initial 10, rang maximal = 30), qui peuvent sortir du top 20 selon les pondérations appliquées.

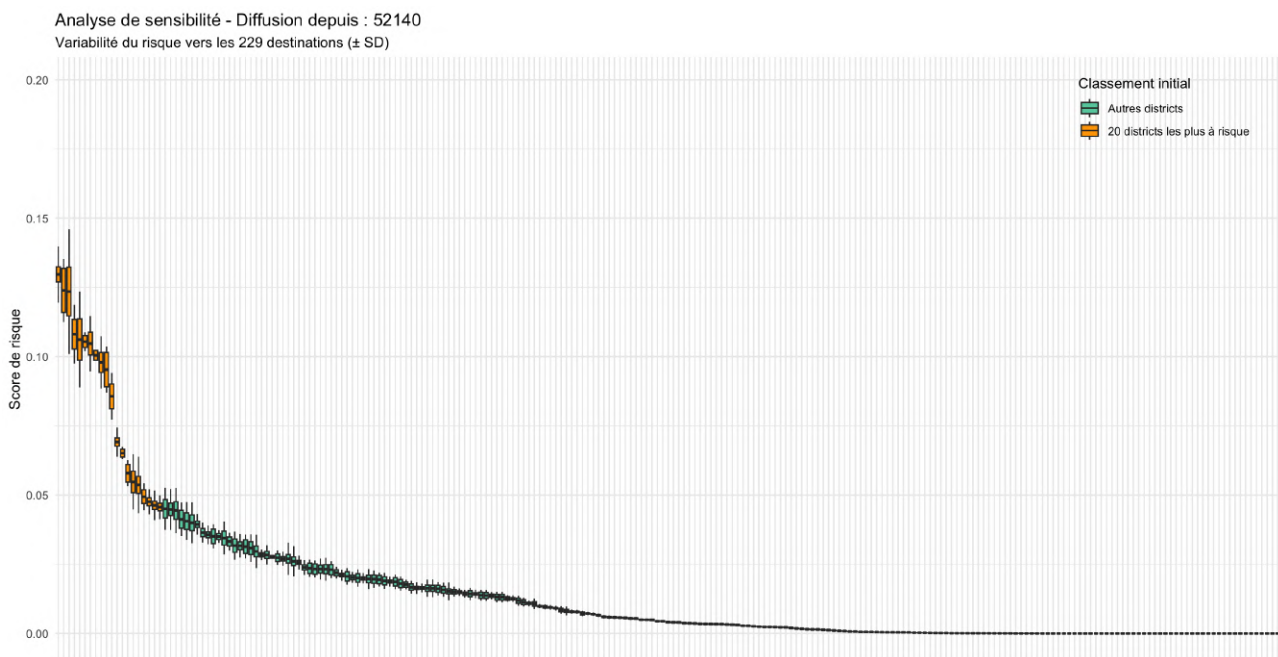


Figure 7 : Score de risque de diffusion du district 52140 après analyse de sensibilité.

En jaune sont représentés les 20 districts les plus à risque de la carte de risque de base. En bleu sont les autres districts.

Pour le district 44270, 13 des 20 districts destinations les plus à risque restent systématiquement dans le top 20 (Annexe 5). Les neuf premiers présentent une bonne stabilité (rang maximal ≤ 11), à l'exception du district 41310 (rang initial 10, rang maximal = 37). Les districts classés entre les rangs 11 et 20 présentent une instabilité plus marquée.

5. Cartes finales de risque

5.1 Cartes finales d'Introduction

Après combinaison, il est obtenu une carte finale par scénario. Pour le scénario 1, cinq districts sont à risque élevé, 17 avec un risque modéré, 60 avec un risque faible et 147 avec un risque très faible. Aucun district ne ressort comme très à risque. Les districts avec risque important se concentrent le long de la côte ouest (Figure 8 A). Pour le scénario 2, neuf districts sont à risque élevé, 17 avec un risque modéré, 55 avec un risque faible et 148 avec un risque très faible. Aucun district ne ressort comme très à risque. Les districts avec le risque le plus important se concentrent le long de la côte ouest (Figure 8 B).

Le scénario 2 présente un nombre légèrement plus élevé de districts à risque élevé (9 contre 5 en scénario 1), reflétant la redistribution des poids vers la voie d'introduction depuis la Chine lorsque le Japon est indemne.

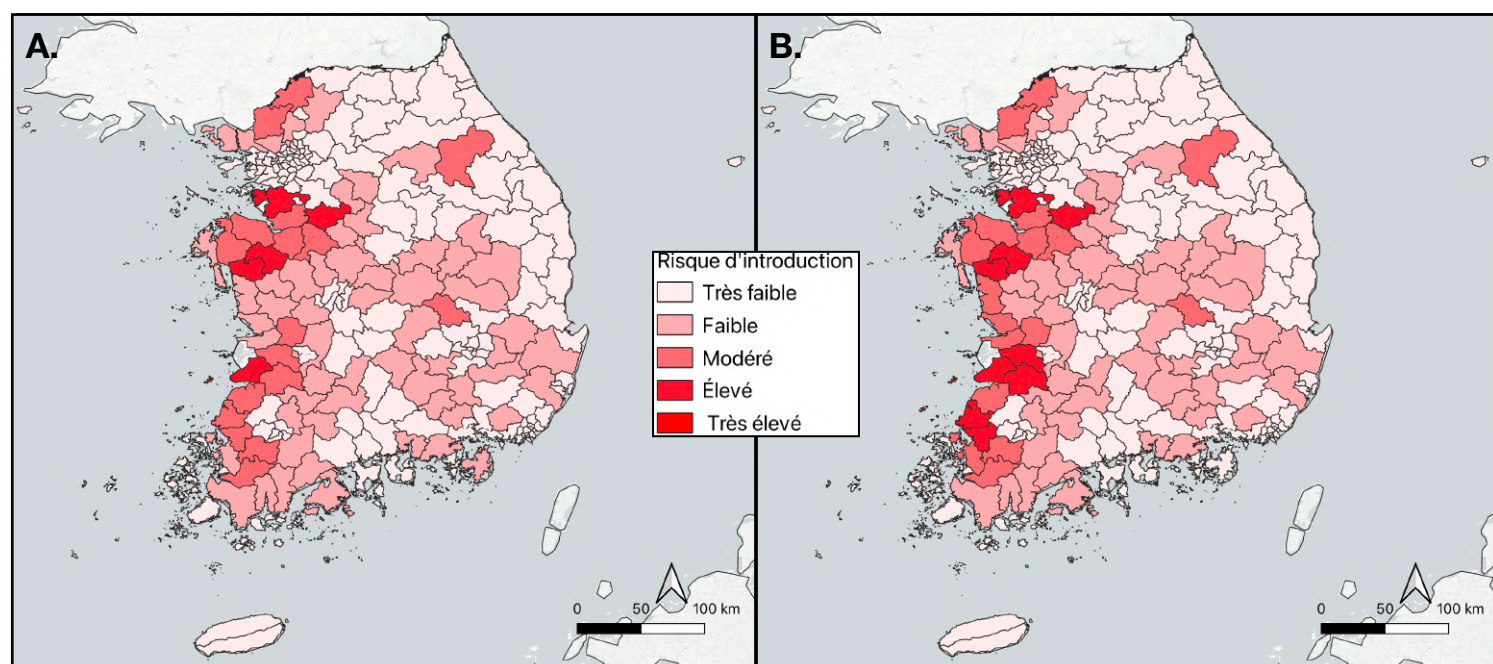


Figure 8 : Cartes de risques d'introduction finales

(A). Carte du risque d'introduction finale pour le scénario 1 (chine et Japon rapportent des foyers de DNC et la situation de la Corée du Nord est inconnue). (B). Carte du risque d'introduction finale pour le scénario 2 (seule la Chine rapporte des foyers, le Japon est indemne et la situation reste inconnue pour la Corée du Nord).

5.2 Cartes finales de diffusion

Après combinaison avec la densité de bovins, 229 cartes de risque finales de diffusion ont été produites. Sur l'ensemble des districts de toutes les cartes de diffusion, quatre paires de districts sont classées à risque élevé, 37 à risque modéré, 413 à risque faible et 51 758 à risque très faible. Afin de visualiser les résultats, deux cartes sont présentées : le district du premier foyer de DNC de 2023 (district 44270, Figure 9A) et un district à risque d'introduction élevé (district 41550, Figure 9B). Pour les deux districts, la grande majorité des districts de destination présente un risque très faible ou faible, avec quelques districts voisins atteignant un niveau modéré pour la carte du district 44270.

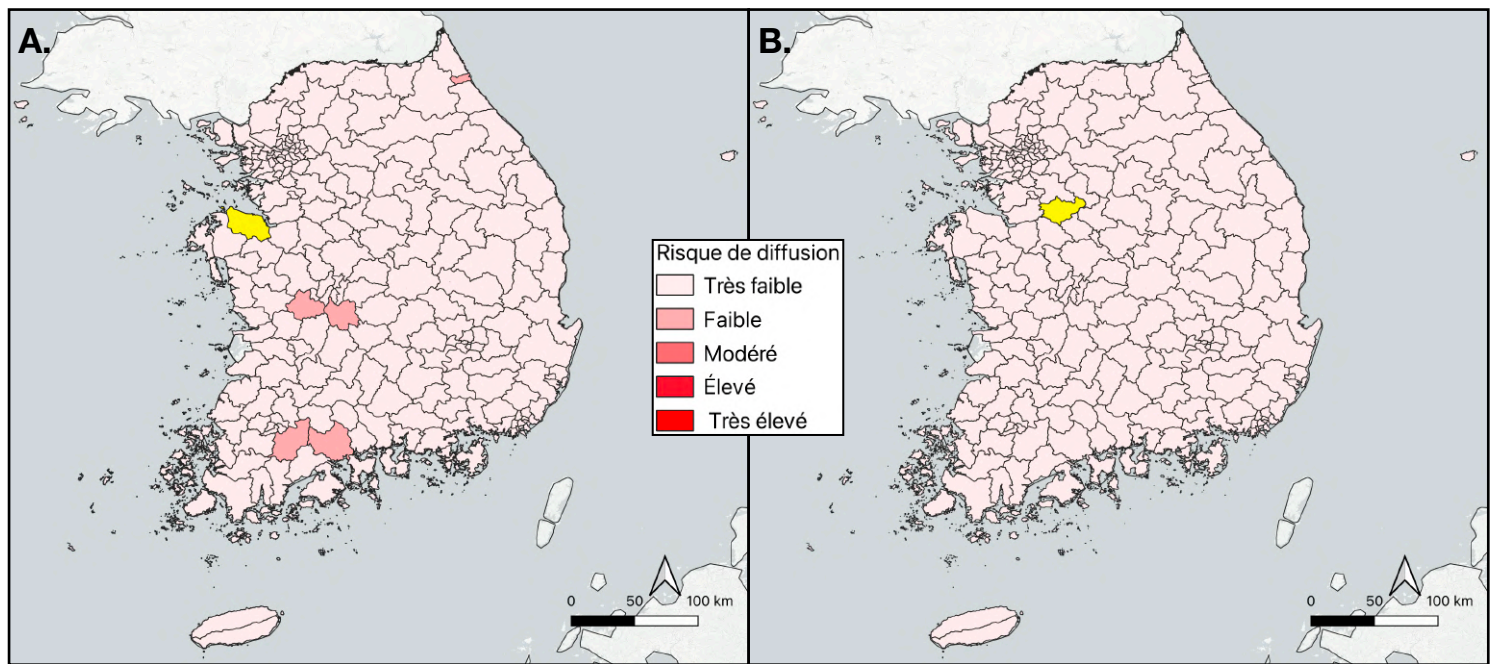


Figure 9 : Cartes de risque de diffusion finales

(A) Carte de risque de diffusion finale pour le district 44270, premier district qui a présenté des foyers de DNC en 2023. (B) Carte de risque de diffusion finale pour le district 41550, district présentant un score de risque élevé pour l'introduction du virus.

Discussion

Cette étude avait pour objectif de cartographier le risque d'introduction et de diffusion de la DNC en Corée du Sud par une approche MCDA-SIG. Elle combine trois voies d'introduction : l'introduction de vecteurs infectés par les vents, l'importation de bovins infectés et l'importation de vecteurs infectés via le transport de chevaux. Pour la diffusion, six voies ont été considérées : les mouvements d'animaux entre fermes, via les marchés et vers les abattoirs, la dispersion vectorielle à courte distance et le transport de vecteurs avec les chevaux. La consultation d'experts a fait ressortir l'importation de bovins comme voie prépondérante en scénario 1 (poids 34,6) et l'introduction de vecteurs par les vents depuis la Chine en scénario 2 (poids 44,2), avec une variabilité inter-experts plus importante pour les voies d'introduction que pour celles de diffusion. Les cartes finales identifient les districts de la côte ouest comme prioritaires pour le risque d'introduction, en cohérence partielle avec la localisation des premiers foyers de 2023 dans le nord-ouest du pays. Les cartes de diffusion montrent quant à elles une concentration du risque sur un nombre très limité de paires de districts, la grande majorité présentant un risque très faible. Des analyses de sensibilité ont montré que ces résultats sont globalement robustes aux variations de pondération, à l'exception des districts importateurs de bovins dont le classement dépend quasi exclusivement du poids attribué à cette voie.

1. Interprétation des résultats

1.1 Introduction aéroportée de vecteurs infectés

L'analyse *forward* met en évidence une différence du risque selon le pays source : les districts du nord et de l'ouest apparaissent plus exposés aux introductions en provenance de Chine ou de Corée du Nord, tandis que les districts du sud semblent davantage concernés par les trajectoires issues du Japon (Annexe 6). Ces résultats reflètent un phénomène d'anisotropie lié aux vents dominants dans cette zone, orientés principalement du nord-ouest vers le sud-est. Cette voie d'introduction est cohérente avec des observations antérieures, notamment en Israël où des foyers de DNC ont été identifiés à 80–200 km de foyers actifs en Égypte, sans qu'aucun mouvement d'animaux documenté ne puisse l'expliquer (Yeruham et al., 1995). Cette voie d'introduction a également été mobilisée dans des travaux de modélisation récents appliqués à la DNC (Bibard et al., 2024 ; Owada et al., 2026), reflétant son importance relative dans la diffusion de la DNC. La consultation d'experts confirme cette tendance. Dans le scénario 1, l'introduction par les vents arrive en deuxième position avec un poids de 29,3. Dans le scénario 2, elle se hisse en tête avec un poids de 44,2 pour les vents en provenance de Chine (Tableau 1).

Cependant, plusieurs limites sont à souligner. Tropolink modélise des trajectoires de masses d'air et non le déplacement d'organismes biologiques individuels. Ainsi, la survie réelle du stomoxe pendant le transport aérien n'est pas intégrée, notamment les effets de la température en altitude, de la déshydratation ou de l'exposition aux UV. De plus, les paramètres biologiques utilisés, comme la hauteur de trajectoire plafonnée à 100 m et la durée maximale de 48 h, reposent sur des données encore peu documentées, rendant ces choix partiellement arbitraires. Il serait pertinent de tester des durées de trajectoire plus courtes, en tenant compte de la fenêtre d'infectiosité du vecteur estimée à 1–2 jours après un repas contaminant, afin de tester les dynamiques de transmission et d'évaluer l'influence de cette hypothèse sur l'estimation du risque. Enfin, le nombre de vecteurs infectés nécessaires pour qu'une transmission soit effective reste à ce jour peu documenté, la situation épidémiologique réelle ainsi que la densité de bovins en Corée du Nord demeurent inconnues, constituant une source d'incertitude supplémentaire. De plus, la proportion des trajectoires qui arrivent en Corée du Sud par rapport à l'ensemble des trajectoires modélisées depuis les points de départ est faible, avec moins de 2,1 % (Annexe 14). Ainsi, même si un vecteur infecté est aspiré par les vents et survit, il a de faibles chances d'arriver en Corée du Sud.

Une perspective intéressante pour tester ces résultats serait la réalisation d'études génétiques de populations de *Stomoxys calcitrans* entre la Chine, la Corée du Nord et la Corée du Sud. L'identification de flux génétiques entre ces populations permettrait de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse d'une dispersion transfrontalière aéroportée. Une telle approche a déjà été utilisée pour caractériser les capacités de dispersion et la connectivité de populations de *S. calcitrans* à différentes échelles géographiques (Tainchum et al., n.d.). Cela pourrait être couplé à une approche phylodynamique des souches virales détectées chez les stomoxes. Comme cela a été réalisé pour d'autres virus transmis par des vecteurs, cette approche permettrait de reconstruire

les relations évolutives entre souches circulantes et d'inférer les voies de diffusion spatio-temporelle du virus dans la péninsule coréenne.

1.2 Introduction par l'importation de bovins infectés

Le constat est différent pour l'importation de bovins infectés, où les données disponibles permettent une analyse plus directe. Le mouvement de bovins infectés est reconnu dans la littérature comme un facteur de diffusion à longue distance important, notamment via les importations légales depuis des zones infectées (EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015 ; Saegerman et al., 2019). Dans le cadre de cette étude, les experts ont considéré la voie d'importation de bovins comme le facteur le plus important pour le scénario 1, lui attribuant un poids de 34,6. Pour le scénario 2, elle arrive en deuxième position avec un poids de 30,9 (Tableau 1). Ce poids élevé contraste pourtant avec le nombre restreint de districts concernés par l'importation de bovins, avec uniquement trois districts recensés dans les données. Les importations coréennes sont en effet concentrées sur un nombre limité d'élevages, incluant un centre de reproduction important annuellement ainsi que deux districts ayant procédé ponctuellement à des importations importantes pour démarrer des élevages de races exotiques. Ce faible volume traduit la volonté du pays de réduire ses importations depuis quelques années (Yoo Sunyoung and Spears, 2025), en raison de l'autosuffisance de la filière bovine nationale, centrée sur la race locale Hanwoo et couvrant déjà l'essentiel des besoins. Afin de tester l'influence des deux districts ayant importé des bovins de façon ponctuelle, les cartes brutes ont été recalculées en les excluant (Annexe 15). Les résultats montrent que les dix premiers districts maintiennent leur ordre de classement pour les deux scénarios, montrant la robustesse du modèle vis-à-vis de ces importations exceptionnelles. Par ailleurs, le seul district importateur restant (le centre de reproduction) se hisse en première position dans les deux scénarios, ce qui n'était pas le cas dans les cartes de base où il était concurrencé par les deux districts aux importations exceptionnelles. Ces résultats soulignent l'importance de mettre à jour régulièrement les données d'importation, car de nouveaux districts peuvent à tout moment réaliser des importations exceptionnelles et modifier significativement la carte de risque.

Enfin, un dernier point doit être souligné : pour être importés en Corée du Sud, les bovins sont soumis à une quarantaine obligatoire dans l'une des deux stations spécialisées du pays, comprenant une inspection clinique individuelle quotidienne. Cependant, aucun test spécifique à la DNC n'y est réalisé ("About Quarantine & Inspection - Animal and Plant Quarantine Agency," n.d.), une partie du risque pourrait donc échapper à la détection lorsque l'animal transite, d'autant qu'une grande proportion des bovins infectés est asymptomatique (Chu et al., 2023). Par ailleurs, les données d'importation utilisées, issues des déclarations de l'APQA de ces trois dernières années, ne reflètent pas nécessairement l'ensemble des mouvements réels. De nouveaux districts pourraient être concernés de façon spontanée dans les années à venir.

Contrairement à certaines études (Farra et al., 2022 ; Mur et al., 2014), les importations illégales n'ont pas été intégrées au modèle. En effet, les caractéristiques géographiques du pays rendent cette voie peu probable. La Corée du Sud est majoritairement côtière, avec des contrôles portuaires stricts et sa seule frontière terrestre est partagée avec la Corée du Nord, dont la zone

démilitarisée limite fortement tout échange. Cette approche est cohérente avec celle adoptée dans des études similaires sur l'introduction de maladies transfrontalières (Marques et al., 2025).

1.3 Introduction de vecteurs infectés via le transport de chevaux

Pour le risque d'introduction de vecteurs infectés via le transport de chevaux, 51 districts sont concernés, soit une distribution géographique plus large que pour l'importation de bovins. Un district se détache nettement avec un score de risque de 1 contre 0,197 pour le second district le plus à risque. Cette différence s'explique par la présence de la plus grande association coréenne des courses hippiques et de la plus grande piste du pays.

Cependant, bien que géographiquement étendue, cette voie repose sur une succession d'événements dont la probabilité conjointe reste faible. Un stomoxe infecté doit être présent sur l'animal au moment du transport, ce vecteur doit survivre au trajet, puis transmettre le virus à un bovin naïf. Chacune de ces étapes est biologiquement plausible, mais leur conjonction reste peu probable (ANSES, 2017). Cela se traduit directement dans la consultation d'experts, où cette voie reçoit systématiquement un poids faible (Annexe 11), un résultat cohérent avec des analyses de risque antérieures (ANSES, 2017 ; Saegerman et al., 2018).

1.4 Transports locaux d'animaux

Concernant la diffusion, les mouvements d'animaux entre fermes, vers les marchés et vers les abattoirs ressortent comme des facteurs de risque importants, ce qui est en accord avec la littérature (EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015 ; Taylor et al., 2019). Les experts montrent une plus grande convergence sur ces voies que sur celles d'introduction, ce qui reflète probablement une base de connaissances plus solide sur ces mécanismes.

À ce jour, aucune mesure de contrôle spécifique à la DNC n'est mise en œuvre lors de ces mouvements à l'intérieur du territoire coréen. L'épisode de réémergence de 2024, survenu chez des animaux non vaccinés en raison d'un non-respect des protocoles de 2023 (Ra et al., 2024), souligne des failles de surveillance interne. Des mesures complémentaires pourraient ainsi être envisagées, telles que le renforcement de la lutte antivectorielle lors des transports, des inspections cliniques avant les déplacements ou une sensibilisation des éleveurs et transporteurs (FAO, 2020 ; Kisbenedek et al., 2017).

En l'absence de données de flux réels, un modèle de gravité a été utilisé, prenant en compte le nombre de fermes par district et la distance intercentroïdes. Cette approche constitue une simplification d'autres facteurs comme le réseau routier ou la saisonnalité des échanges pouvant jouer un rôle. Elle a néanmoins été retenue pour sa simplicité et sa robustesse démontrée dans des contextes similaires (Liu, 2022). Le modèle de gravité utilisé repose sur deux paramètres uniquement : le nombre de fermes et la distance. Cela constitue une simplification volontaire. D'autres facteurs impactent les flux d'animaux, comme les pratiques locales d'élevage ou le réseau de transport (Liu, 2022). Cependant, en raison de l'absence de données réelles, leur intégration aurait démultiplié l'incertitude sans nécessairement améliorer la pertinence du modèle.

La disponibilité future de données de traçabilité individuelle constituerait une amélioration majeure pour affiner ces estimations.

1.5 Consultation d'experts

Les réponses étaient hétérogènes pour les voies d'introduction, avec des écarts-types importants entre experts allant jusqu'à 42 (Tableau 1). Le désaccord sur la voie d'importation de bovins est particulièrement marqué, avec des poids individuels allant de 1 à 90. Un écart-type du même ordre que la moyenne elle-même traduit une incertitude importante, probablement liée à des références et expériences différentes entre experts. Le poids final calculé pour cette voie doit donc être interprété avec précaution, davantage comme une moyenne de positions divergentes que comme un véritable consensus. Une meilleure convergence est observée pour les voies de diffusion, avec un écart type maximal de 15 (Tableau 2). Cette asymétrie entre les écarts types des voies d'introduction et ceux des voies de diffusion n'est pas surprenante. Les événements d'introduction sont plus rares et difficiles à lier à un mécanisme précis, contrairement aux mouvements d'animaux qui sont des processus plus documentés et étudiés.

Une revue des méthodes d'évaluation du risque d'introduction de maladies animales montre que le recours à l'avis d'experts pour paramétrer ce type de modèle est fréquent. Les panels vont généralement de 2 à 14 experts selon les études, ce qui situe le nombre d'experts mobilisés ici comparable à d'autres travaux (Krueger et al., 2012 ; Saegerman et al., 2019 ; Stevens et al., 2009). Interroger un plus grand nombre d'experts permettrait probablement d'affiner ces poids et de réduire l'incertitude associée.

1.6 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité réalisée permet d'évaluer dans quelle mesure les cartes brutes sont robustes à des variations de pondération. Cette analyse montre que les valeurs de risque varient selon les réponses des experts consultés. Cela confirme l'importance du choix des experts consultés. Or, dans cette étude, ce choix s'est porté sur des profils combinant expertise en DNC et/ou en stomoxes, avec des experts français, mais aussi des experts locaux plus à même de comprendre le contexte local. L'analyse de sensibilité confirme la robustesse globale des cartes brutes : 10 districts sur 20 maintiennent systématiquement leur position dans le top 20 quelle que soit la variation de pondération testée (Figure 8, Annexe 5). Ce résultat s'explique par le fait que ces districts présentent des scores élevés sur plusieurs voies simultanément, réduisant leur dépendance au poids d'une voie unique. Deux exceptions notables concernent les districts 42760 et 11470, tous deux importateurs de bovins, dont le classement est extrêmement instable en raison de leur dépendance quasi-exclusive à la voie d'importation de bovins, précisément celle sur laquelle le désaccord inter-expert est le plus marqué. L'instabilité de 42760 persiste dans les deux scénarios, confirmant qu'elle relève uniquement de l'incertitude sur la voie d'importation de bovins, indépendamment du contexte épidémique régional.

L'analyse de sensibilité de la diffusion révèle une robustesse globale satisfaisante, comparable à celle observée pour l'introduction. La majorité des districts destinations prioritaires maintiennent

leur position quelle que soit la variation de pondération, ce qui suggère que leur risque élevé est porté par plusieurs voies simultanément. Ces résultats doivent cependant être interprétés en tenant compte du fait que l'analyse a été conduite district par district depuis un district source unique, ainsi la robustesse du classement peut varier selon le district source considéré.

1.7 Cartes finales de risque

Les cartes finales de diffusion présentent une très grande majorité de valeurs très faibles, avec seulement 4 paires de districts à risque élevé et 37 à risque modéré sur l'ensemble des 229 cartes produites. Ce résultat s'explique par la combinaison de deux effets. D'une part, les scores bruts de diffusion sont eux-mêmes faibles et fortement asymétriques, comme observé dans les histogrammes (Figure 4). D'autre part, la matrice de risque combinant le score de diffusion avec la densité de bovins tend à abaisser encore le niveau de risque final lorsque les deux variables sont faibles simultanément. Ainsi, même des districts présentant un score de diffusion brut non nul peuvent se retrouver classés en très faible risque final si leur densité de bovins est également faible. Cette limite soulève une question fondamentale quant à l'utilisation des cartes de diffusion dans leur forme actuelle. En effet, un outil d'aide à la décision dont 99 % des valeurs se concentrent dans la catégorie la plus basse offre une capacité de discrimination entre les districts très réduite, et risque d'être peu exploitable par les services vétérinaires coréens pour prioriser leurs efforts de surveillance. Il convient donc de l'interpréter non pas comme une carte de risque absolu, mais comme un outil de hiérarchisation relative entre districts. Dans ce cadre, une présentation des résultats sous forme de classement pourrait être envisagée. Plusieurs pistes pourraient améliorer également ces résultats. Premièrement, l'utilisation de données réelles de mouvements d'animaux en remplacement du modèle de gravité augmenterait vraisemblablement la variabilité des scores entre districts, certains flux réels étant probablement beaucoup plus concentrés que ce que le modèle estimé. Deuxièmement, présenter les résultats de diffusion différemment, comme sous forme de classement relatif des districts plutôt que de classes de risque absolu. Cela pourrait être plus informatif dans ce contexte, en permettant d'identifier les districts les plus à risque même lorsque les niveaux absolus restent faibles.

2. Limites et incertitudes

2.1 Vecteurs

Le score de compatibilité climatique présente une très faible variabilité entre les districts, avec des valeurs comprises entre 0,01 et 0,10 en période de basse activité et entre 0,70 et 0,90 en haute activité. Plusieurs facteurs l'expliquent. D'une part, les moyennes mensuelles issues de WorldClim lissent la variabilité intra-mensuelle réelle. D'autre part, leur agrégation à l'échelle des districts réduit encore l'information disponible. Enfin, la superficie réduite de la Corée du Sud estimée à 99.618 km² ("Corée du Sud - Présentation de la Corée du Sud | France Diplomatie," n.d.), induit de faibles différences de températures entre districts (Annexe 16), réduisant encore la variabilité. En conséquence, ce score n'a pas été intégré dans les cartes finales, mais il est admis

que le risque sera globalement plus élevé en période de haute activité vectorielle (mai–octobre) et moindre en période de basse activité (novembre–avril).

Les précipitations ont par ailleurs été exclues du calcul, leur variation n'ayant pas d'impact significatif en Corée du Sud où l'humidité reste suffisante toute l'année pour le développement du vecteur. Ce choix, justifié dans le contexte coréen, limite en revanche la portabilité du modèle à d'autres contextes climatiques. Des données sur l'abondance des vecteurs dans le pays permettraient néanmoins d'intégrer ce paramètre dans la prédisposition des districts.

La modélisation repose exclusivement sur *Stomoxys calcitrans*, en raison de sa présence avérée sur le continent coréen et de sa compétence pour la transmission mécanique de la DNC (Chihota et al., 2001 ; Issimov et al., 2020). D'autres vecteurs sont pourtant présents en Asie de l'Est : *moustiques Aedes*, *culicoïdes*, *tabanidés*, dont le rôle potentiel reste encore à ce jour mal caractérisé (Li et al., 2023 ; Sprygin et al., 2019). De plus, la présence de virus DNC de type vaccinal a récemment été détectée chez *Musca domestica* à proximité de la frontière occidentale de la Chine (Wang et al., 2022), suggérant que d'autres espèces muscidiées pourraient jouer un rôle encore inexploré. Enfin, le seuil d'abondance de vecteurs nécessaire pour qu'une transmission soit effective reste très peu documenté, rendant difficile toute calibration précise de ce paramètre. Cette incertitude se répercute potentiellement sur les sorties du modèle de dispersion vectoriel, puisque le nombre de vecteurs viables transportés par le vent n'est pas non plus quantifié.

2.2 MCDA

L'approche MCDA-SIG présente plusieurs avantages dans ce contexte. Contrairement aux modèles statistiques classiques, elle ne nécessite pas de données épidémiologiques en grande quantité, ce qui la rend adaptée à une situation comme celle de la Corée du Sud où seulement deux épidémies de DNC ont été recensées. Elle permet également d'intégrer des informations de nature hétérogène dans un cadre unique, transparent et reproductible. Cependant, cette approche comporte des limites. La normalisation par le maximum peut comprimer artificiellement les scores des autres districts lorsqu'un district atypique porte la valeur maximale.

La combinaison du risque d'introduction et de la densité de bovins via une matrice qualitative permet de prioriser les districts. Cette approche est cohérente avec le cadre OIE, qui recommande l'évaluation qualitative pour la majorité des analyses de risque (OIE, 2010). La densité de bovins, utilisée ici comme proxy de la prédisposition d'un district, reflète directement la présence d'hôtes pour le virus. Cependant, cette variable ne prend pas en compte tous les éléments pouvant jouer sur la prédisposition d'un district, comme le statut vaccinal des troupeaux, la qualité des systèmes de surveillance ou l'abondance de vecteurs. Ces limites invitent à interpréter les résultats comme un outil de priorisation relative plutôt que comme une estimation absolue du risque. De plus, à l'avenir, ces matrices pourraient être ajustées afin de correspondre au mieux à la combinaison du risque réel, soit par une consultation de la littérature ou par des experts.

Enfin, la performance du modèle pourrait être évaluée en comparant les cartes finales de risques avec les données de l'épidémie de DNC de 2023 en Corée du Sud. Un test de permutation pourrait être appliqué, afin de vérifier si l'observation est due au hasard.

3. Conclusion et perspectives

Cette étude est, à notre connaissance, la première cartographie systématique du risque d'introduction et de diffusion de la DNC en Corée du Sud par une approche MCDA-SIG avec consultation d'experts. Les cartes produites permettent d'identifier les districts prioritaires pour la surveillance différenciée selon les saisons d'activité vectorielle et les scénarios épidémiologiques régionaux. Dans le futur, ces cartes pourront être améliorées grâce à l'intégration de données réelles de traçabilité des mouvements d'animaux afin de remplacer le modèle de gravité par des flux observés. De plus, des études d'abondance, de génétique des populations vectorielles et des analyses phylogéographiques du virus entre pays voisins permettraient de tester les hypothèses de dispersion aéroportée.

Sur le plan opérationnel, ces cartes pourraient être utilisées par les services vétérinaires coréens pour renforcer la surveillance. Elles permettraient par exemple, d'orienter les efforts d'inspection clinique et de lutte antivectorielle en priorité vers les districts identifiés comme à risque, en particulier en période de haute activité du vecteur. Dans le futur, la méthodologie développée ici pourrait également être appliquée à d'autres maladies vectorielles émergentes présentant des profils de diffusion similaires afin d'améliorer la surveillance de ces maladies. Enfin, bien que le modèle ait été calibré spécifiquement pour le contexte sud-coréen, une démarche similaire pourrait être adaptée aux données disponibles dans d'autres pays. Ceci constituerait un outil concret d'aide à la décision pour anticiper l'introduction et la diffusion de la DNC et plus largement d'autres maladies vectorielles transfrontalières.

Références

- About Quarantine & Inspection - Animal and Plant Quarantine Agency [WWW Document], n.d. URL http://qia.go.kr/english/html/Animal_livestock/02AnimalLivestock_003-5.jsp (accessed 4.16.26).
- Abutarbush, S.M., Ababneh, M.M., Al Zoubi, I.G., Al Sheyab, O.M., Al Zoubi, M.G., Alekish, M.O., Al Gharabat, R.J., 2015. Lumpy Skin Disease in Jordan: Disease Emergence, Clinical Signs, Complications and Preliminary-associated Economic Losses. *Transbound. Emerg. Dis.* 62, 549–554. <https://doi.org/10.1111/tbed.12177>
- Aleksandr, K., Olga, B., David, W.B., Pavel, P., Yana, P., Svetlana, K., Alexander, N., Vladimir, R., Dmitriy, L., Alexander, S., 2020. Non-vector-borne transmission of lumpy skin disease virus. *Sci. Rep.* 10, 7436. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64029-w>
- Al-Salihi, K.A., 2014. Lumpy Skin disease: Review of literature 3, 6–23.
- ANSES, 2017. Risk of introduction of lumpy skin disease into France (Collective expert report). ANSES opinion.
- Bailey, D.L., Whitfield, T.L., Smittle, B.J., 1973. Flight and dispersal of the stable fly 66, 410–411.
- Beresford, D.V., Sutcliffe, J.F., 2012. Field Measurements of Stable Fly (Diptera: Muscidae) Demography, Fecundity, and Survival Based on Daily Trap Catches at a Beef Farm in Southern Ontario Over a 5-yr Period. *J. Med. Entomol.* 49, 1262–1269. <https://doi.org/10.1603/ME11279>
- Berry, I.L., Campbell, J.B., 1985. Time and Weather Effects on Daily Feeding Patterns of Stable Flies (Diptera: Muscidae). *Environ. Entomol.* 14, 336–342. <https://doi.org/10.1093/ee/14.3.336>
- Bianchini, J., Simons, X., Humblet, M.-F., Saegerman, C., 2023. Lumpy Skin Disease: A Systematic Review of Mode of Transmission, Risk of Emergence and Risk Entry Pathway. *Viruses* 15, 1622. <https://doi.org/10.3390/v15081622>
- Bibard, A., Martinetti, D., Giraud, A., Picado, A., Chalvet-Monfray, K., Porphyre, T., 2025. Quantitative risk assessment for the introduction of bluetongue virus into mainland Europe by long-distance wind dispersal of *Culicoides* spp.: A case study from Sardinia. *Risk Anal.* 45, 108–127. <https://doi.org/10.1111/risa.14345>
- Bibard, A., Martinetti, D., Picado, A., Chalvet-Monfray, K., Porphyre, T., 2024. Assessing the Risk of Windborne Dispersal of *Culicoides* Midges in Emerging Epizootic Hemorrhagic Disease Virus Outbreaks in France. *Transbound. Emerg. Dis.* 2024, 5571195. <https://doi.org/10.1155/2024/5571195>
- Butler, J.F., Kloft, W.J., DuBose, L.A., Kloft, E.S., 1977. Recontamination of Food After Feeding a 32P Food Source to Biting Muscidae1, 2. *J. Med. Entomol.* 13, 567–571. <https://doi.org/10.1093/jmedent/13.4-5.567>
- Campbell, J.B., 2006. Horse Insect Control Guide.
- CDC, 2026. How CFA Conducts Risk Assessments [WWW Document]. CFA Qual. Assess. URL <https://www.cdc.gov/cfa-qualitative-assessments/php/about/risk-assessment-methods.html> (accessed 6.23.26).
- Chihota, C.M., Rennie, L.F., Kitching, R.P., Mellor, P.S., 2001. Mechanical transmission of lumpy skin disease virus by *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Epidemiol. Infect.* 126, 317–321. <https://doi.org/10.1017/S0950268801005179>
- Chu, K.S., Jung, W.R., Yang, S.H., Lee, M.C., Shon, K.R., 2023. The first outbreak of lumpy skin disease in Jeollabuk-do, Korea. *Korean J. Vet. Serv.* 46, 339–348. <https://doi.org/10.7853/kjvs.2023.46.4.339>
- Corée du Sud - Présentation de la Corée du Sud | France Diplomatie [WWW Document], n.d. URL <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/information-par-pays/coree-du-sud/presentation-de-la-coree-du-sud> (accessed 6.20.26).
- Duvallet, G., Hogsette, J.A., 2023. Global Diversity, Distribution, and Genetic Studies of Stable Flies (*Stomoxys* sp.). *Diversity* 15, 600. <https://doi.org/10.3390/d15050600>
- Eddy, G.W., Roth, A.R., Plapp, F.W., 1962. Studies on the flight habits of some marked insects 55, 603–607.
- EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015. Scientific Opinion on lumpy skin disease. *EFSA J.* 13, 3986. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3986>
- FAO, 2020. Introduction and spread of lumpy skin disease in South, East and Southeast Asia. *FAO*. <https://doi.org/10.4060/cb1892en>
- Farra, D., De Nardi, M., Lets, V., Holopura, S., Klymenok, O., Stephan, R., Boreiko, O., 2022. Qualitative assessment of the probability of introduction and onward transmission of lumpy skin disease in Ukraine. *Microb. Risk Anal.* 20, 100200. <https://doi.org/10.1016/j.mran.2021.100200>
- Fick, S.E., Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Florez-Cuadros, M., Berkebile, D., Brewer, G., Taylor, D.B., 2019. Effects of Diet Quality and Temperature on Stable Fly (Diptera: Muscidae) Development. *Insects* 10, 207. <https://doi.org/10.3390/insects10070207>
- Fusade-Boyer, M., Pato, P.S., Komlan, M., Dogno, K., Batawui, K., Go-Maró, E., McKenzie, P., Guinat, C., Secula, A., Paul, M., Webby, R.J., Tran, A., Waret-Szkuta, A., Ducatez, M.F., 2020. Risk Mapping of Influenza D Virus Occurrence in Ruminants and Swine in Togo Using a Spatial Multicriteria Decision Analysis Approach. *Viruses* 12, 128. <https://doi.org/10.3390/v12020128>
- Gari, G., Waret-Szkuta, A., Grosbois, V., Jacquiet, P., Roger, F., 2010. Risk factors associated with observed clinical lumpy skin disease in Ethiopia. *Epidemiol. Infect.* 138, 1657–1666. <https://doi.org/10.1017/S0950268810000506>
- Gilbert, M., Nicolas, G., Cinardi, G., Van Boeckel, T.P., Vanwambeke, S.O., Wint, G.R.W., Robinson, T.P., 2018. Global distribution data for cattle, buffaloes, horses, sheep, goats, pigs, chickens and ducks in 2010. *Sci. Data* 5, 180227. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.227>
- Gilles, J., David, J.-F., Duvallet, G., 2005. Temperature Effects on Development and Survival of Two Stable Flies, *Stomoxys calcitrans* and *Stomoxys niger niger* (Diptera: Muscidae), in La Réunion Island. *J. Med. Entomol.* 42, 260–265. <https://doi.org/10.1093/jmedent/42.3.260>
- Harris, R.L., Chamberlain, W.F., Frazar, E.D., 1974. Horn Flies and Stable Flies: Free-Choice Feeding of Methoprene Mineral Blocks to Cattle for Control. *J. Econ. Entomol.* 67, 384–386. <https://doi.org/10.1093/jee/67.3.384>
- Harris, R.L., Frazar, E.D., Grossman, P.D., Graham, O.H., 1966. Mating Habits of the Stable Fly. *J. Econ. Entomol.* 59, 634–636. <https://doi.org/10.1093/jee/59.3.634>
- Hogsette, J.A., Ruff, J.P., 1985. Stable Fly (Diptera: Muscidae) Migration in Northwest Florida. *Environ. Entomol.* 14, 170–175. <https://doi.org/10.1093/ee/14.2.170>
- Islam, S., Ali, M.Z., Islam, Md.A., Yasmin, F., Rahman, Md.A., Shahadat, Md.N., Islam, Md.S., Islam, A., Azad, Md.A.K., 2026. The global scenario of lumpy skin disease, its epidemiological investigation, and prevalence in livestock: A review. *Vet. Anim. Sci.* 32, 100625. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2026.100625>
- Issimov, A., Kutumbetov, L., Orynbayev, M.B., Khairullin, B., Myrzakhmetova, B., Sultankulova, K., White, P.J., 2020. Mechanical Transmission of Lumpy Skin Disease Virus by *Stomoxys* spp. (*Stomoxys calcitrans*, *Stomoxys sitiens*, *Stomoxys indica*), Diptera: Muscidae. *Animals* 10, 477. <https://doi.org/10.3390/ani10030477>
- Jacquiet, P., Rouet, D., Bouhsira, E., Salem, A., Liénard, E., Franc, M., 2014. Population dynamics of *Stomoxys calcitrans* (L.) (Diptera: Muscidae) in southwestern France. *Rev Méd Vét* 165, 267–271.
- Jones, C.J., Milne, D.E., Patterson, R.S., Schreiber, E.T., Milio, J.A., 1992. Nectar Feeding by *Stomoxys calcitrans* (Diptera: Muscidae): Effects on Reproduction and Survival. *Environ. Entomol.* 21, 141–147. <https://doi.org/10.1093/ee/21.1.141>
- Kahana-Sutin, E., Klement, E., Lensky, I., Gottlieb, Y., 2017. High relative abundance of the stable fly *Stomoxys calcitrans* is associated with lumpy skin disease outbreaks in Israeli dairy farms. *Med. Vet. Entomol.* 31, 150–160. <https://doi.org/10.1111/mve.12217>
- Killough, R.A., McKinstry, D.M., 1965. Mating and Oviposition Studies of the Stable Fly. *J. Econ. Entomol.* 58, 489–491. <https://doi.org/10.1093/jee/58.3.489>
- Kisbenedek, A., Tuppurainen, E., Alexandrov, T., Beltrán-Alcrudo, D., 2017. Lumpy skin disease field manual - A manual for veterinarians (No. FAO Animal Production and Health Manual No. 20). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Krueger, T., Page, T., Hubacek, K., Smith, L., Hiscock, K., 2012. The role of expert opinion in environmental modelling. *Environ. Model. Softw.*, Thematic issue on Expert Opinion in Environmental Modelling and Management 36, 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.011>
- La situation mondiale de la santé animale (No. 12025), 2025. . Organisation mondiale de la santé animale, Paris. <https://doi.org/https://doi.org/10.20506/woah.3587>
- Lee, S., Baker, C.M., Sellens, E., Stevenson, M.A., Roche, S., Hall, R.N., Breed, A.C., Firestone, S.M., 2024. A systematic review of epidemiological modelling in response to lumpy skin disease outbreaks. *Front. Vet. Sci.* 11, 1459293. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1459293>
- Li, Y., An, Q., Sun, Z., Gao, X., Wang, H., 2023. Risk Factors and Spatiotemporal Distribution of Lumpy Skin Disease Occurrence in the Asian Continent during 2012–2022: An Ecological Niche Model. *Transbound. Emerg. Dis.* 2023, 6207149. <https://doi.org/10.1155/2023/6207149>
- Liu, Y., 2022. Mapping cattle transportation movements in New Zealand : Application of spatial techniques on cattle transportation flows. The university of Auckland, New Zealand.
- Lysyk, T.J., 1998. Relationships Between Temperature and Life-History Parameters of *Stomoxys calcitrans* (Diptera: Muscidae). *J. Med. Entomol.* 35, 107–119. <https://doi.org/10.1093/jmedent/35.2.107>

- Ma, J., Yuan, Y., Shao, J., Sun, M., He, W., Chen, J., Liu, Q., 2022. Genomic characterization of lumpy skin disease virus in southern China. *Transbound. Emerg. Dis.* 69, 2788–2799. <https://doi.org/10.1111/tbed.14432>
- MacDonald R. A. S, 1930. Pseudo-urticaria of cattle. *North. Rhod. Dep. Anim. Health Annual Report*, 20–21.
- Marques, A.R.P., Gonzalez Villeta, L., Simons, R., Horigan, V., de Vos, C., Conrady, B., 2025. Quantitative risk assessment for infectious disease introduction in animal populations: a comprehensive review. *Front. Vet. Sci.* 12, 1648695. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1648695>
- Mazloun, A., Van Schalkwyk, A., Babiuk, S., Venter, E., Wallace, D.B., Sprygin, A., 2023. Lumpy skin disease: history, current understanding and research gaps in the context of recent geographic expansion. *Front. Microbiol.* 14, 1266759. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1266759>
- Meyer, J.A., Petersen, J.J., 1983. Characterization and Seasonal Distribution of Breeding Sites of Stable Flies and House Flies (Diptera: Muscidae) on Eastern Nebraska Feedlots and Dairies. *J. Econ. Entomol.* 76, 103–108. <https://doi.org/10.1093/jee/76.1.103>
- Mulatu, E., Feyisa, A., 2018. Review: Lumpy Skin Disease. *J. Vet. Sci. Technol.* 09. <https://doi.org/10.4172/2157-7579.1000535>
- Mullens, B.A., Peterson, N.G., 2005. Relationship Between Rainfall and Stable Fly (Diptera: Muscidae) Abundance on California Dairies. *J. Med. Entomol.* 42, 705–708. <https://doi.org/10.1093/jmedent/42.4.705>
- Mur, L., Martínez-López, B., Costard, S., De La Torre, A., Jones, B.A., Martínez, M., Sánchez-Vizcaíno, F., Muñoz, M., Pfeiffer, D.U., Sánchez-Vizcaíno, J., Wieland, B., 2014. Modular framework to assess the risk of African swine fever virus entry into the European Union. *BMC Vet. Res.* 10, 145. <https://doi.org/10.1186/1746-6148-10-145>
- Namazi, F., Khodakaram Tafti, A., 2021. Lumpy skin disease, an emerging transboundary viral disease: A review. *Vet. Med. Sci.* 7, 888–896. <https://doi.org/10.1002/vms3.434>
- OIE, 2019. Chapitre 1.3. Diseases, infections and infestations listed by the OIE, in: *Terrestrial Animal Health Code*. World Organization for Animal Health.
- OIE, 2010. Handbook on import risk analysis volume 1 (No. 1). The World Organisation for Animal Health.
- OMSA, n.d. Ancienne classification des maladies notifiables à l'OIE – Liste A. OMSA - Organ. Mond. Santé Anim. URL <https://www.woah.org/fr/ce-que-nous-faisons/sante-et-bien-etre-animale/maladies-animales/ancienne-classification-des-maladies-notifiables-a-loie-liste-a/> (accessed 1.19.26).
- Owada, K., C. Castonguay, A., Hall, R.N., Ambrose, R.K., Hayes, B.J., Mahony, T.J., Soares Magalhães, R.J., 2026. A geospatial model of entry pathways of lumpy skin disease virus introduction into Australia. *Sci. Rep.* 16, 8561. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-39806-8>
- Paslaru, A.I., Verhulst, N.O., Maurer, L.M., Brendle, A., Pauli, N., Vögtlin, A., Renzullo, S., Ruedin, Y., Hoffmann, B., Torgerson, P.R., Mathis, A., Veronesi, E., 2021. Potential mechanical transmission of Lumpy skin disease virus (LSDV) by the stable fly (*Stomoxys calcitrans*) through regurgitation and defecation. *Curr. Res. Insect Sci.* 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.cris.2020.100007>
- Patra, G., Behera, P., Das, S.K., Saikia, B., Ghosh, S., Biswas, P., Kumar, A., Alam, S.S., Kawlani, L., Lalnunpuia, C., Lalchhandama, C., Bachan, M., Debbarma, A., 2018. *Stomoxys calcitrans* and its importance in livestock: a review.
- Ra, D., Kim, H.-S., Jeong, C., Yoo, D. sung, Cho, H.-S., Oh, Y., 2024. Lumpy skin disease outbreak and quarantine in the Incheon area. *Korean J. Vet. Serv.* 47, 179–183. <https://doi.org/10.7853/kjvs.2024.47.3.179>
- Richard, H., Martinetti, D., Lercier, D., Fouillat, Y., Hadi, B., Elkahky, M., Ding, J., Michel, L., Morris, C.E., Berthier, K., Maupas, F., Soubeyrand, S., 2023. Computing Geographical Networks Generated by Air-Mass Movement. *GeoHealth* 7, e2023GH000885. <https://doi.org/10.1029/2023GH000885>
- Rochon, K., Hogsette, J.A., Kaufman, P.E., Olafson, P.U., Swiger, S.L., Taylor, D.B., 2021. Stable Fly (Diptera: Muscidae)—Biology, Management, and Research Needs. *J. Integr. Pest Manag.* 12, 38. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmab029>
- Saegerman, C., Bertagnoli, S., Meyer, G., Ganière, J., Caufour, P., De Clercq, K., Jacquiet, P., Hautefeuille, C., Eto, F., Casal, J., 2019. Risk of introduction of Lumpy Skin Disease into France through imports of cattle. *Transbound. Emerg. Dis.* 66, 957–967. <https://doi.org/10.1111/tbed.13111>
- Saegerman, C., Bertagnoli, S., Meyer, G., Ganière, J.-P., Caufour, P., Clercq, K.D., Jacquiet, P., Fournié, G., Hautefeuille, C., Eto, F., Casal, J., 2018. Risk of introduction of lumpy skin disease in France by the import of vectors in animal trucks. *PLOS ONE* 13, e0198506. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198506>
- Sanogo, I.N., Fusade-Boyer, M., Molia, S., Koita, O.A., Camus, C., Ducatez, M.F., 2024. Identification of risk areas for avian influenza outbreaks in domestic poultry in Mali using the GIS-MCDA approach. *Epidemiol. Infect.* 152, e152. <https://doi.org/10.1017/S0950268824001390>

- Showler, A.T., Osbrink, W.L.A., 2015. Stable Fly, *Stomoxys calcitrans* (L.), Dispersal and Governing Factors. *Int. J. Insect Sci.* 7, 19–25. <https://doi.org/10.4137/IJIS.S21647>
- Simmons, S.W., Dove, W.E., 1941. Breeding Places of the Stablefly or “Dog Fly” *Stomoxys calcitrans* (L.) in Northwestern Florida1. *J. Econ. Entomol.* 34, 457–462. <https://doi.org/10.1093/jee/34.3.457>
- Somasundaram Mathan Kumar, 2011. An Outbreak of Lumpy Skin Disease in a Holstein Dairy Herd in Oman: A Clinical Report. *Clin. Rep. Asian J. Anim. Vet. Adv.* 6, 851–859. <https://doi.org/10.3923/ajava.2011.851.859>
- Sprygin, A., Pestova, Y., Wallace, D.B., Tuppurainen, E., Kononov, A.V., 2019. Transmission of lumpy skin disease virus: A short review. *Virus Res.* 269, 197637. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2019.05.015>
- Stevens, K., de Glanville, W., Costard, S., Métras, R., Theuri, W., Kruska, R., Randolph, T., Grace, D., Hendrickx, S., Pfeiffer, D., 2009. Mapping the Likelihood of Introduction and Spread of Highly Pathogenic Avian Influenza Virus H5N1 in Africa and Indonesia using Multicriteria Decision Modelling. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2025.3713-3730>
- Sudhakar, S.B., Mishra, N., Kalaiyarasu, S., Jhade, S.K., Hemadri, D., Sood, R., Bal, G.C., Nayak, M.K., Pradhan, S.K., Singh, V.P., 2020. Lumpy skin disease (LSD) outbreaks in cattle in Odisha state, India in August 2019: Epidemiological features and molecular studies. *Transbound. Emerg. Dis.* 67, 2408–2422. <https://doi.org/10.1111/tbed.13579>
- Tainchum, K., Duvallet, G., Akranakul, P., Chareonviriyaphap, T., 2009. Genetic Diversity and Gene Flow among Stable Fly Populations, *Stomoxys calcitrans* (L.) in Thailand 526–537.
- Taylor, D.B., Berkebile, D.R., Scholl, P.J., 2007. Stable Fly Population Dynamics in Eastern Nebraska in Relation to Climatic Variables. *J. Med. Entomol.* 44, 765–771. <https://doi.org/10.1093/jmedent/44.5.765>
- Taylor, D.B., Friesen, K., Zhu, J., 2017. Precipitation and Temperature Effects on Stable Fly (Diptera: Muscidae) Population Dynamics. *Environ. Entomol.* 46, 434–439. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx032>
- Taylor, R.A., Berriman, A.D.C., Gale, P., Kelly, L.A., Snary, E.L., 2019. A generic framework for spatial quantitative risk assessments of infectious diseases: Lumpy skin disease case study. *Transbound. Emerg. Dis.* 66, 131–143. <https://doi.org/10.1111/tbed.12993>
- WAHIS, n.d. COUNTRY DASHBOARD [WWW Document]. URL <https://wahis.woah.org/#/dashboards/country-or-disease-dashboard> (accessed 5.18.26).
- Wang, Y., Zhao, L., Yang, J., Shi, M., Nie, F., Liu, S., Wang, Z., Huang, D., Wu, H., Li, D., Lin, H., Li, Y., 2022. Analysis of vaccine-like lumpy skin disease virus from flies near the western border of China. *Transbound. Emerg. Dis.* 69, 1813–1823. <https://doi.org/10.1111/tbed.14159>
- Williams, D.F., Rogers, A.J., 1976. Vertical and Lateral Distribution of Stable Flies in Northwestern Florida1. *J. Med. Entomol.* 13, 95–98. <https://doi.org/10.1093/jmedent/13.1.95>
- Yazid Khatib, 2025. Lumpy skin disease in the Middle East - historical and statistical data. *Bov. Dis.* 14, 24–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.29326/2304-196X-2025-14-1-24-31>
- Yeruham, I., Nir, O., Braverman, Y., Davidson, M., Grienstein, H., Haymovitch, M., Zamir, O., 1995. Spread of lumpy skin disease in Isreal dairy herds. <https://doi.org/10.1136/vr.137.4.91>
- Yoo Sunyoung, Spears, Z., 2025. Livestock and products Semi-annual. United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service, Republic of Korea.
- Zipf, G.K., 1946. The P1 P2/D Hypothesis: On the Intercity Movement of Persons. *Am. Sociol. Rev.* 11, 10. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2087063>
- Zumpt, F., 1973. The Stomoxyine biting flies of the world. *Diptera: Muscidae. Taxonomy, biology, economic importance and control measures*, Gustav Fisher Verlag. ed. Stuttgart.

Annexes

Annexe 1 : Consultation d'experts : document de synthèse

Synthèse d'information pour éclairer une élicitation d'expert sur le risque d'introduction et de diffusion de dermatose nodulaire contagieuse en Corée du Sud

Contexte

En octobre 2023, la dermatose nodulaire contagieuse (DNC) a été détectée pour la première fois en Corée du Sud. Suite à ces premiers foyers, la maladie s'est répandue rapidement à travers le pays, atteignant 107 cas en 33 jours. Des mesures ont alors été immédiatement mises en place, avec des zones sanitaires, une restriction des mouvements d'animaux vivants, des mesures de lutttes anti-vectorielles, ainsi que des inspections cliniques dites « intensives ». De plus, dès le 26 octobre 2023, une campagne de vaccination nationale d'urgence a été mise en place en commençant par les zones réglementées. Enfin, des mesures d'abattage réactif ont été déployées, en abattant et enfouissant tous les animaux des élevages infectés (*Chu et al., 2023, Ra et al., 2024*). Cette épidémie a entraîné d'importantes pertes économiques pour les éleveurs et la filière bovine sud coréenne. Cependant, en 2024, une deuxième épidémie est survenue, mais plus modérée avec seulement 24 élevages infectés recensés. Le premier cas rapporté était un animal non vacciné. Une enquête a révélé que les mesures de vaccination n'ont pas été ou mal été respectées par certains élevages (*Ra et al., 2024*).

Objectif du travail et de votre contribution

L'APQA (Animal and Plant Quarantine Agency), institut gouvernemental assurant la protection zoosanitaire et phytosanitaire nationale (inspection aux frontières, diagnostic, épidémiosurveillance et laboratoire de référence WOH), cherche à renforcer sa lutte contre les maladies vectorielles, et notamment à développer une meilleure gestion et surveillance. Pour cela, l'APQA a établi une convention de collaboration scientifique avec l'ENV. L'objectif est d'évaluer et développer des outils d'évaluation du risque pour des maladies vectorielles, dans le but de développer une surveillance et une gestion basées sur le risque. Ici, l'idée est de créer des cartes de risque d'introduction dans le pays et de diffusion au sein du pays de la dermatose nodulaire contagieuse, afin de permettre une anticipation des potentielles futures épidémies et une réaction la plus rapide et efficace possible en cas de re-émergence de la maladie.

Pour ce faire, dans un premier temps, les principales voies d'introduction en Corée du Sud, puis de diffusion au sein du pays ont été identifiées (Figure 1).

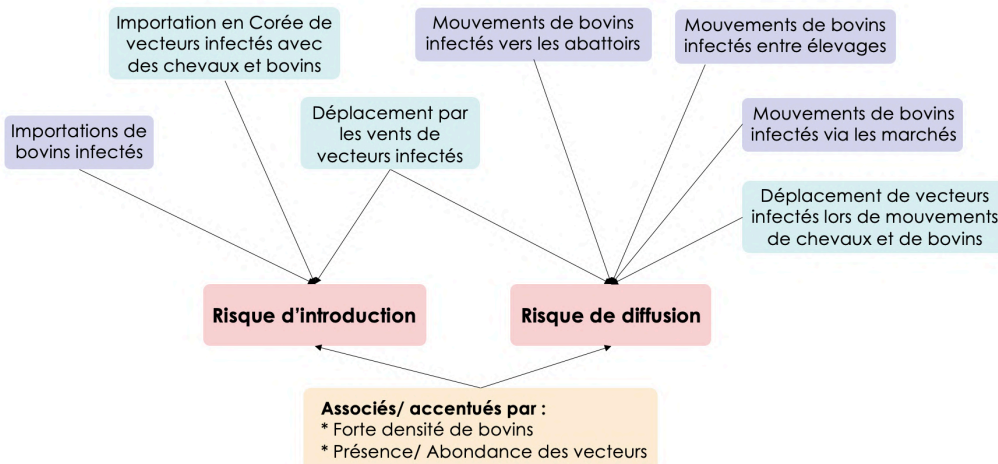


Figure 1 : Schéma des principales voies identifiées d'introduction et de diffusion de la dermatose nodulaire contagieuse en Corée du Sud.

Pour l'introduction du virus de la DNC en Corée, le travail cherche à qualifier le risque par district en considérant l'introduction depuis l'étranger de bovins infectés, l'arrivée depuis l'étranger de vecteurs infectés transportés par les vents et par le biais des mouvements internationaux d'animaux (bovins et chevaux).

Pour la diffusion, la qualification du risque par district considère les déplacements de bovins entre les élevages situés dans des districts différents, les déplacements de bovins le long du réseau des marchés de bovins vivants et à destination des abattoirs, les déplacements de vecteurs portés par les vents à courte distance et par l'intermédiaire des transports d'animaux (bovins et chevaux) entre les districts.

Pour chacune de ces voies, nous avons collecté les données pertinentes auprès de notre partenaire coréen, et les avons analysées afin d'évaluer la distribution relative par district du risque d'introduction ou de diffusion sur le territoire coréen associée à cette voie. Ce travail a donc permis de générer des cartes de risque pour chacune des voies. L'objectif est maintenant d'arriver à combiner ces cartes en attribuant un poids à chaque voie d'introduction ou de diffusion en fonction de la perception par les experts de l'importance relative de cette voie. Par la suite, ces risques par district seront pondérés par la densité de bovins et l'abondance de vecteurs.

Dans la suite de ce document, nous avons synthétisé l'ensemble des informations importantes à connaître pour que vous puissiez exprimer votre jugement quant à l'importance relative de chacune des voies d'introduction et de diffusion. En particulier, vous seront présentées des synthèses bibliographiques sur la transmission du virus, l'écologie des stomoxes, puis des informations collectées et analysées sur chacune des voies d'introduction et de diffusion.

Transmission de la DNC

Le virus de la DNC peut être transmis de différentes façon, notamment par transmission vectorielle mécanique via des vecteurs hématophages comme les stomoxes ou les moustiques du genre *Aedes Aegypti*, voire par contact direct entre bovins (*Chihota et al., 2001; Issimov et al., 2020*). À ce jour, parmi les vecteurs mécaniques connus pour la DNC, seul *Stomoxys calcitrans* est recensé en Corée du Sud. Ce vecteur se contamine au cours d'un repas sanguin sur un animal infectieux et peut ensuite le transmettre lors d'un nouveau repas sur un animal naïf. La transmission se fait de manière mécanique, c'est-à-dire que le virus ne se réplique pas dans le vecteur. Des infections expérimentales de Stomoxes ont montré que des particules virales infectantes peuvent persister dans les pièces buccales jusqu'à 2 jours après un repas sanguin contaminant (*Paslaru et al., 2021*).

Caractéristiques écologiques des stomoxes

Un stomoxe présente un cycle de développement de 12 à 60 jours en fonction des conditions climatiques (*Lysyk, 1998*), puis de 2 à 4 semaines au stade adulte (*Gilles et al., 2005*). La présence de cet insecte est étroitement liée aux élevages, car les femelles ont besoin de matières organiques végétales en décomposition et de fumiers pour y pondre leurs œufs et permettre le développement larvaire (*Simmons and Dove, 1941*).

Chez cet insecte les deux sexes sont hématophages et peuvent prendre d'un à plusieurs repas de sang par jour (*Berry and Campbell, 1985; Harris et al., 1974*). Les repas sont souvent interrompus en raison de la réaction douloureuse de l'hôte, ce qui peut nécessiter entre 5 à 20 tentatives pour qu'un repas complet soit obtenu (*Baldacchino et al., 2013*). Ce comportement favorise la transmission mécanique d'agents pathogènes d'un hôte à l'autre.

Ce vecteur est plutôt sédentaire, bien qu'il puisse occasionnellement parcourir quelques kilomètres à la recherche d'hôtes (*Showler and Osbrink, 2015*). Cependant il peut arriver que l'insecte soit transporté par les vents et diffuse alors sur de longues distances. Bien qu'il y ait peu d'études à ce sujet, il a été trouvé des stomoxes à parfois 225 km de leurs points de départ (*Hogsette and Ruff, 1985*).

Enfin, les conditions climatiques n'influencent pas seulement le cycle de développement, mais aussi l'activité des adultes. En fonction de la température et l'humidité, des pics d'activité peuvent être observés au cours de l'année et également au cours de la journée (*Keawrayup et al., 2012*)

1. RISQUE D'INTRODUCTION

1.1. Introduction de bovins infectés en Corée par l'import international

Pour cette voie, le bovin doit s'infecter dans son pays d'origine, être transporté pendant sa phase d'incubation sans être identifié comme étant infecté et être autorisé à entrer en Corée du sud.

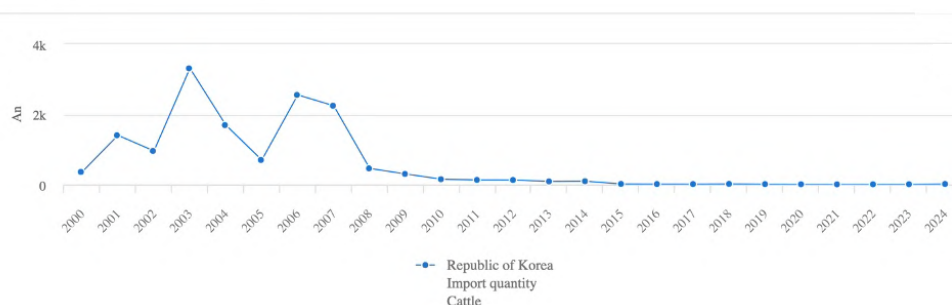
Concernant la voie d'introduction par l'importation de bovins vivants, deux jeux de données ont été mobilisés.

Le premier, fourni par les instances coréennes, se concentre sur les années 2024 et 2025, et recense 3 bovins importés sur cette période, en provenance des Etats-Unis et du Canada.

Le second jeu de données, issu de FAOSTAT (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>) reprend les importations depuis 2020. Il indique une nette diminution du nombre de bovins importés à partir de 2007- 2008 (Figure 2). Ce faible nombre de bovins s'explique par la volonté du pays de réduire ses importations depuis quelques années (Yoo Sunyoung and Spears, 2025), en raison de l'autosuffisance de la filière bovine nationale, qui est centrée sur la race locale Hanwoo, couvrant déjà l'essentiel des besoins. Entre 2021 et 2024, 510 bovins auraient été importés en Corée. Aujourd'hui, les seuls pays autorisés à exporter des bovins vers la Corée sont l'Australie et la nouvelle Zélande, actuellement indemnes de DNC (*"List of Countries eligible for export to Korea," n.d.*).

a) Imports of Cattle in Republic of Korea

2000 - 2024



b) Imports of Cattle in Republic of Korea

2024 - 2025

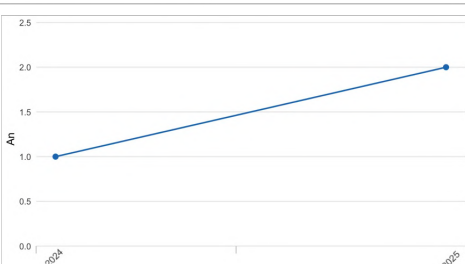


Figure 2 : (a) Evolution annuelle du nombre de bovins importés en Corée du sud de 2000 à 2024 (source FAOstat : <https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>) et (b) de 2024 à 2025 (source APQA)

Sur le plan sanitaire, tous les bovins recensés dans les deux jeux de données, étaient en provenance de pays indemnes de DNC l'année de l'exportation. De plus, pour pouvoir être importés en Corée du Sud, les bovins sont soumis à une inspection avant leur importation, puis à une quarantaine obligatoire dans l'une des deux stations spécialisées de Corée du Sud, comprenant une inspection clinique quotidienne individuelle, cependant à notre connaissance il n'y a pas de tests spécifiques à la DNC de réalisés, avant qu'ils soient autorisés à entrer définitivement, soit renvoyés dans leur pays d'origine ou abattus (*"About Quarantine & Inspection - Animal and Plant Quarantine Agency," n.d.*).

Tous les bovins, issus de la base de données de Corée, sont importés par avion via l'aéroport d'Incheon. L'information sur le mode de transport n'est pas renseignée pour les données issues de FAOSTAT (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>).

1.2. Introduction de vecteurs infectés

1.2.1 Par le transport de bovins

Pour cette voie, le vecteur doit se nourrir sur un bovin infectieux à proximité de bovins s'apprêtant à être exportés en Corée du sud, puis soit transporté avec ces bovins, survive, reste infectant jusqu'à son arrivée en Corée.

Compte tenu du faible volume de bovins transportés, la probabilité qu'un vecteur infecté soit transporté avec des bovins, survive et transmette la maladie a été considérée comme négligeable comparativement au risque d'introduction du virus via le transport de bovins infectés. Ainsi, il a été choisi de négliger le risque de mouvement de vecteurs infectés via l'import de bovins, celui-ci étant déjà pris en compte par ailleurs.

1.2.2 Par le transport de chevaux

Pour la voie par l'importation de chevaux, cela implique que le vecteur se contamine sur un bovin infectieux à proximité de chevaux s'apprêtant à être exportés en Corée du sud, puis soit transporté avec ces chevaux, survive, reste infectant jusqu'à son arrivée en Corée.

Des données liées à l'import de chevaux ont été fournies par l'APQA. L'import de 1041 chevaux entre janvier 2023 et décembre 2025 y est recensé provenant des pays suivants : Argentine, Australie, France, Chine, Angleterre, Hong Kong, Japon, Pays bas, Nouvelle-Zélande, États-Unis et Émirats Arabes Unis. Ces chevaux sont généralement importés pour le sport ou l'élevage. Tous les chevaux sont transportés par avion jusqu'au même aéroport (Incheon). À noter que les pays exportateurs n'étaient pas tous indemnes de dermatose nodulaire au moment de l'export (notamment la Chine et le Japon).

1.3. Introduction de vecteurs par les vents à longue distance

Un stomoxe peut occasionnellement être aspiré par des courants d'air et transporté sur de longues distances (*Yeruham et al., 1995, Mulatu and Feyisa, 2018*) et donc potentiellement diffuser la maladie à des territoires voisins. Pour en estimer les trajectoires, des simulations ont été réalisées via le modèle de diffusion de particules inclus dans l'outil Tropolink (*Richard et al, 2023*), en prenant en compte les paramètres biologiques du vecteur : une hauteur maximale de 100m et une durée de trajectoire de maximum 48h. Les trajectoires ont été lancées à partir d'une grille de points de départ répartis de manière homogène dans les zones d'élevage de bovins (définies par les zones avec une densité de bovins supérieure à 10 têtes/km² (*Gilbert et al 2010*)), localisées dans les pays voisins de la Corée du Sud (Chine, Japon et Corée du Nord) et à moins de 1000 km des côtes coréennes (Figure 3). Pour chacun de ces points, les trajectoires ont été simulées pour chaque journée de la période allant du 1 janvier 2020 au 31 décembre 2025.

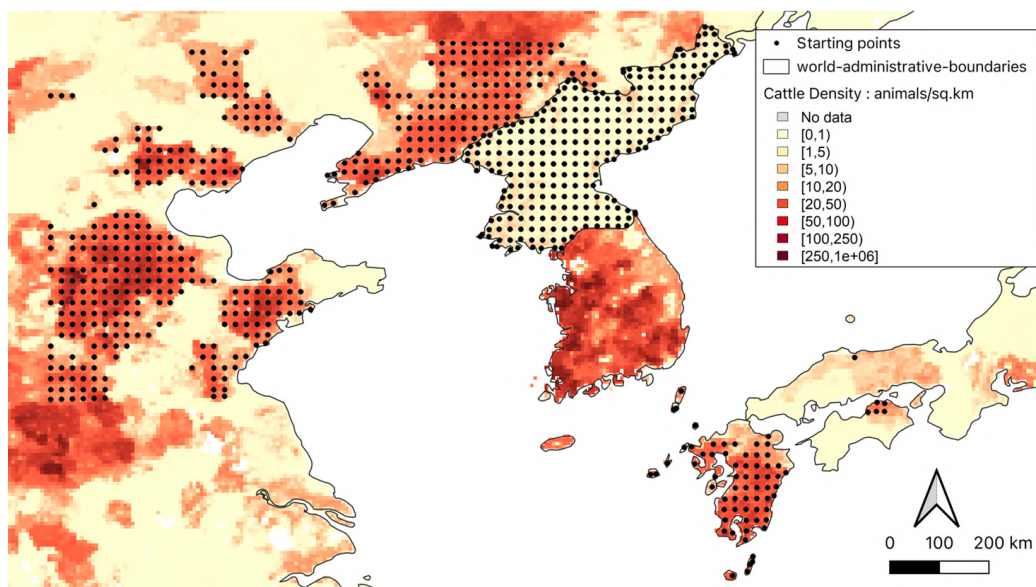


Figure 3 : Carte de la localisation des points de départs de l'analyse des trajectoires de vol à longue distance.

Les points de départ définis pour l'analyse sont représentés en noir. Le dégradé de jaune vers le rouge indique la densité de bovins (source : [Gilbert et al 2010](#)).

1.3.1. Introduction de vecteurs en provenance de la Chine

Situation épidémiologique en Chine : la Chine a déclaré des cas de DNC dès 2019. Les données épidémiologiques enregistrées sur EMPRES-I (<https://empres-i.apps.fao.org/general>), le système d'information de la FAO, signalent 19 foyers de DNC en 2019, 57 en 2020 et 1 en 2024. Cependant, les rapports mensuels gouvernementaux (*Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2026*), accessibles depuis juillet 2023, mentionnent 87 cas en 2023, 49 en 2024, 132 cas en 2025 et 16 depuis le 1^{er} janvier 2026. La localisation des foyers mentionnés dans ces rapports n'est pas connue.

Simulation des trajectoires par les vents : 3 843 519 trajectoires de particules répondant aux paramètres cohérents avec la biologie des stomoxes ont été simulées en utilisant les données météorologiques de ces points le jour de la trajectoire simulée. Parmi toutes ces trajectoires, 0,79% (30 721/3 843 519) arrivent en Corée du Sud.

1.3.2. Introduction de vecteurs en provenance du Japon

Situation épidémiologique au Japon : en 2024, le Japon a déclaré 22 foyers de DNC sur l'île la plus méridionale (celle la plus proche de la Corée du sud), mais n'en a pas rapporté d'autres depuis.

Simulation des trajectoires par les vents : 620 164 trajectoires de particules répondant aux paramètres cohérents avec la biologie des stomoxes ont été simulées en utilisant les données météorologiques de ces points. Sur l'ensemble de ces points, 0,57% (3 850/ 620 164) arrivent en Corée du Sud.

1.3.3. Introduction de vecteurs en provenance de la Corée du Nord

Situation épidémiologique en Corée du Nord : aucune donnée sur la présence ou l'absence du virus ne semblent disponibles.

Simulation des trajectoires par les vents : la distribution de la densité des bovins n'étant pas connue, les points de départ des simulations ont donc été créés sur l'ensemble du pays (Figure 3). Depuis l'ensemble de ces points, 2 246 213 trajectoires ont été modélisées avec 4,61% (108 613/ 2 246 213) d'entre elles qui arrivent en Corée du Sud.

2. RISQUE DE DIFFUSION

2.1. Par les transports

Les transports d'animaux sont un élément important dans la diffusion de la DNC (*EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015*). Un bovin infecté peut être transporté d'un district touché vers un district sain, mais un vecteur porteur du virus peut aussi être déplacé avec des animaux, que ce soient des bovins ou des chevaux, et diffuser le virus dans d'autres districts. À notre connaissance, il n'y a pas de mesures de contrôle ou de surveillance spécifiques à la DNC pour les transports.

2.1.1. Diffusion par les transports entre élevages de bovins infectés

Le nombre de bovins transportés entre districts n'est pas connu.

En raison de l'absence de données, un modèle de gravité a été utilisé pour estimer les flux potentiels.

2.1.2. Diffusion par les marchés

Des marchés d'animaux vivants sont présents en Corée du Sud et entraînent le transport d'un nombre d'animaux vers et depuis les marchés. Des données sur la localisation et la capacité en nombre de bovins des 81 marchés de bovins vivants sur l'année 2025 ont été fournies par l'APQA. Au cours de cette année, les marchés ont vu de 314 bovins à 17 293 bovins, avec en médiane 5927 bovins et au total 542 454 bovins échangés en 2025.

2.1.3. Diffusion par les transports vers les abattoirs

Les transports vers les abattoirs constituent une voie de diffusion : un animal infecté peut directement introduire le virus dans un nouveau district, mais des vecteurs transportés avec lui peuvent également y diffuser le virus. Les données fournies par l'APQA comprennent 1 339 406 transports de bovins vers 66 abattoirs et 4 066 transports de chevaux vers 18 abattoirs, avec respectivement 76 % et 58,2 % des animaux provenant d'un district différent de celui de l'abattoir.

2.1.4. Diffusion par les vecteurs avec les chevaux transportés entre les fermes :

Le transport de vecteurs infectés via les mouvements de chevaux entre élevages constitue une voie potentielle de diffusion supplémentaire. Le nombre de chevaux transportés entre districts n'étant pas connu, un modèle de gravité a été utilisé pour estimer les flux potentiels, selon la même approche que celle décrite en 2.1.1. Les mêmes mesures réglementaires s'appliquent également à ces mouvements (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2017)

2.2. Diffusion par les vecteurs par le vent ou le vol à courte distance

Ces vecteurs étant plutôt sédentaires, le périmètre de vol à courte distance est alors limité généralement de quelques kilomètres à 13km (*Showler and Osbrink, 2015*).

Références :

Butler, J.F., Kloft, W.J., DuBose, L.A., Kloft, E.S., 1977. Recontamination of Food After Feeding a 32P Food Source to Biting Muscidae1, 2. J Med Entomol 13, 567–571. <https://doi.org/10.1093/jmedent/13.4-5.567>

Chu, K.S., Jung, W.R., Yang, S.H., Lee, M.C., Shon, K.R., 2023. The first outbreak of lumpy skin disease in Jeollabuk-do, Korea. Korean J. Vet. Serv 46, 339–348. <https://doi.org/10.7853/kjvs.2023.46.4.339>

Chihota, C.M., Rennie, L.F., Kitching, R.P., Mellor, P.S., 2001. Mechanical transmission of lumpy skin disease virus by *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). Epidemiol. Infect. 126, 317–321. <https://doi.org/10.1017/S0950268801005179>

Issimov, A., Kutumbetov, L., Orynbayev, M.B., Khairullin, B., Myrzakhmetova, B., Sultankulova, K., White, P.J., 2020. Mechanical Transmission of Lumpy Skin Disease Virus by *Stomoxys* spp. (*Stomoxys calcitrans*, *Stomoxys sitiens*, *Stomoxys indica*), Diptera: Muscidae. Animals 10, 477. <https://doi.org/10.3390/ani10030477>

- Paslaru, A.I., Verhulst, N.O., Maurer, L.M., Brendle, A., Pauli, N., Vögtlin, A., Renzullo, S., Ruedin, Y., Hoffmann, B., Torgerson, P.R., Mathis, A., Veronesi, E., 2021. Potential mechanical transmission of Lumpy skin disease virus (LSDV) by the stable fly (*Stomoxys calcitrans*) through regurgitation and defecation. *Current Research in Insect Science* 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.cris.2020.100007>
- Lysyk, T.J., 1998. Relationships Between Temperature and Life-History Parameters of *Stomoxys calcitrans* (Diptera: Muscidae). *J Med Entomol* 35, 107–119. <https://doi.org/10.1093/jmedent/35.2.107>
- Gilles, J., David, J.-F., Duvallet, G., 2005. Temperature Effects on Development and Survival of Two Stable Flies, *Stomoxys calcitrans* and *Stomoxys niger niger* (Diptera: Muscidae), in La Réunion Island. *J Med Entomol* 42, 260–265. <https://doi.org/10.1093/jmedent/42.3.260>
- Simmons, S.W., Dove, W.E., 1941. Breeding Places of the Stablefly or “Dog Fly” *Stomoxys calcitrans* (L.) in Northwestern Florida1. *J Econ Entomol* 34, 457–462. <https://doi.org/10.1093/jee/34.3.457>
- Berry, I.L., Campbell, J.B., 1985. Time and Weather Effects on Daily Feeding Patterns of Stable Flies (Diptera: Muscidae). *Environ Entomol* 14, 336–342. <https://doi.org/10.1093/ee/14.3.336>
- Harris, R.L., Chamberlain, W.F., Frazer, E.D., 1974. Horn Flies and Stable Flies: Free-Choice Feeding of Methoprene Mineral Blocks to Cattle for Control13. *J Econ Entomol* 67, 384–386. <https://doi.org/10.1093/jee/67.3.384>
- Baldacchino, F., Muenworn, V., Desquesnes, M., Desoli, F., Charoenviriyaphap, T., Duvallet, G., 2013. Transmission of pathogens by *Stomoxys* flies (Diptera, Muscidae): a review. *Parasite* 20, 26. <https://doi.org/10.1051/parasite/2013026>
- Showler, A.T., Osbrink, W.L.A., 2015. Stable Fly, *Stomoxys calcitrans* (L.), Dispersal and Governing Factors. *Int J Insect Sci* 7, 19–25. <https://doi.org/10.4137/IJIS.S21647>
- Hogsette, J.A., Ruff, J.P., 1985. Stable Fly (Diptera: Muscidae) Migration in Northwest Florida. *Environmental Entomology* 14, 170–175. <https://doi.org/10.1093/ee/14.2.170>
- Keawrayup, S., Duvallet, G., Sukonthabhirom, S., Chareonviriyaphap, T., 2012. Diversity of *Stomoxys* spp. (Diptera: Muscidae) and diurnal variations of activity of *Stomoxys indicus* and *S. Calcitrans* in a farm, in Wang Nam Khiao District, Nakhon ratchasima Province, Thailand. *Parasite* 19, 259–265. <https://doi.org/10.1051/parasite/2012193259>
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2026. 2026 年 2 月 全国主要动物疫病报告情况.
- Yoo Sunyoung, Spears, Z., 2025. Livestock and products Semi-annual. United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service, Republic of Korea.
- List of Countries eligible for export to Korea [WWW Document], n.d. URL https://www.qia.go.kr/english/html/About_QIA/listqiaEngNoticeWebAction.do?type=21&clear=1#
- About Quarantine & Inspection - Animal and Plant Quarantine Agency [WWW Document], n.d. URL http://qia.go.kr/english/html/Animal_livestock/02AnimalLivestock_003-5.jsp
- MAFRA, 2019. Import health requirements for competition horses and returning horses.
- EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), 2015. Scientific Opinion on lumpy skin disease. *EFSA Journal* 13, 3986. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3986>
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2017. ACT ON THE PREVENTION OF CONTAGIOUS ANIMAL DISEASES.
- Li, Y., An, Q., Sun, Z., Gao, X., Wang, H., 2023. Risk Factors and Spatiotemporal Distribution of Lumpy Skin Disease Occurrence in the Asian Continent during 2012–2022: An Ecological Niche Model. *Transbound Emerg Dis* 2023, 6207149. <https://doi.org/10.1155/2023/6207149>

Mulatu, E., Feyisa, A., 2018. Review: Lumpy Skin Disease. J Vet Sci Technol 09.
<https://doi.org/10.4172/2157-7579.1000535>

Richard, H., Martinetti, D., Lercier, D., Fouillat, Y., Hadi, B., Elkahky, M., Ding, J., Michel, L., Morris, C.E., Berthier, K., Maupas, F., Soubeyrand, S., 2023. Computing Geographical Networks Generated by Air-Mass Movement. GeoHealth 7, e2023GH000885. <https://doi.org/10.1029/2023GH000885>

Gilbert, M., Nicolas, G., Cinardi, G., Van Boeckel, T.P., Vanwambeke, S.O., Wint, G.R.W., Robinson, T.P., 2018. Global distribution data for cattle, buffaloes, horses, sheep, goats, pigs, chickens and ducks in 2010. Sci Data 5, 180227. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.227>

Ra, D., Kim, H.-S., Jeong, C., Yoo, D. sung, Cho, H.-S., Oh, Y., 2024. Lumpy skin disease outbreak and quarantine in the Incheon area. Korean Journal of Veterinary Service 47, 179–183.
<https://doi.org/10.7853/kjvs.2024.47.3.179>

Yeruham, I., Nir, O., Braverman, Y., Davidson, M., Grienstein, H., Haymovitch, M., Zamir, O., 1995. Spread of lumpy skin disease in Isreal dairy herds. <https://doi.org/10.1136/vr.137.4.91>

Évaluation du risque d'introduction et de diffusion de dermatose nodulaire contagieuse en Corée du sud

En octobre 2023, la dermatose nodulaire contagieuse a été détectée pour la première fois en Corée du Sud, entraînant une épidémie rapide avec 107 cas en 33 jours, suivie d'une seconde vague en 2024. Face à ce contexte, l'APQA (Animal and Plant Quarantine Agency), institut gouvernemental en charge de la protection zoosanitaire et phytosanitaire nationale, cherche à renforcer sa surveillance et sa gestion des maladies vectorielles. Dans ce cadre, une collaboration scientifique a été établie avec l'ENVT, avec pour objectif le développement d'outil d'évaluation du risque permettant une gestion basée sur le risque.

Ce travail a conduit à l'identification des principales voies d'introduction de la maladie en Corée du Sud depuis l'étranger, ainsi que des voies de diffusion au sein du territoire. Pour chacune de ces voies, une analyse des données disponibles a permis de produire des cartes de risque d'introduction ou de diffusion. Nous cherchons maintenant à combiner ces cartes en une carte de risque globale, en attribuant à chaque voie un poids proportionnel à son importance relative.

En l'absence de données fiables dans la littérature, nous avons décidé d'estimer ces poids par une élicitation d'experts. Cette élicitation est l'objet de ce questionnaire. Votre expertise est sollicitée afin d'estimer, parmi l'ensemble des voies identifiées, lesquelles vous semblent les plus susceptibles de contribuer 1) à l'introduction du virus de la DNC en Corée du sud et 2) à la diffusion du virus de la DNC sur le territoire coréen. Vos réponses permettront de pondérer chaque voie avec une incertitude associée pour produire une carte de risque globale, destinée à orienter les actions de surveillance et de réponse rapide de l'APQA en cas de réémergence de la dermatose nodulaire contagieuse.

Voici les questions : 1 / 2

Risque d'introduction

Pour ce risque d'introduction, on considérera deux scénarios indépendamment :

Scénario 1 :

Dans cette situation, il est rapporté que la Chine présente des foyers de DNC dont la localisation est inconnue, mais également le Japon avec des foyers au sud du pays. Cependant pour la Corée du Nord, la situation n'est pas connue.

Consignes : On admet 100 introductions de dermatose nodulaire en Corée du Sud. Compte tenu des éléments présentés dans le document de synthèse et de votre expertise, répartissez ces 100 introductions en fonction de votre perception de la vraisemblance de chacune des voies d'introduction. Si vous ne savez pas, ou êtes dans l'incapacité de répondre veuillez cocher la case « Je suis dans l'incapacité de répondre ».

Introduction par l'import de bovins infectés (et des vecteurs infectés transportés avec les bovins) :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction par des vecteurs infectés transportés par les vents en provenance de la Chine :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction par des vecteurs infectés transportés par les vents en provenance du Japon :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction par des vecteurs infectés transportés par les vents en provenance de la Corée du Nord :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction des vecteurs infectés transportés avec des chevaux importés :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

☐ Je suis dans l'incapacité de répondre

Quel niveau d'incertitude associez-vous à vos réponses

- ☐ Très faible, je suis très confiant dans ma hiérarchisation des voies
- ☐ Modérée, il est possible que ma hiérarchisation ne reflète que partiellement l'importance relative des voies d'introduction
- ☐ Élevée, je n'ai pas assez d'éléments pour formuler un jugement fiable

Scénario 2 :

Dans cette situation 2, contrairement à la première, il est rapporté que la Chine présente des cas de DNC, mais pas le Japon. Cependant pour la Corée du Nord la situation n'est pas connue.

Consigne : On admet 100 introductions de dermatose nodulaire en Corée du Sud. Compte tenu des éléments présentés dans le document de synthèse et de votre expertise, répartissez ces 100 introductions en fonction de votre perception de la vraisemblance de chacune des voies. Si vous ne savez pas, ou êtes dans l'incapacité de répondre veuillez cocher la case « Je suis dans l'incapacité de répondre ».

Introduction par l'import de bovins infectés (et des vecteurs infectés transportés avec les bovins) :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction par des vecteurs infectés transportés par les vents en provenance de la Chine :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction par des vecteurs infectés transportés par les vents en provenance du Japon :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction par des vecteurs infectés transportés par les vents en provenance de la Corée du Nord :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Introduction des vecteurs infectés transportés avec des chevaux importés :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

☐ Je suis dans l'incapacité de répondre

Quel niveau d'incertitude associez-vous à vos réponses

- ☐ Très faible, je suis très confiant dans ma hiérarchisation des voies
- ☐ Modérée, il est possible que ma hiérarchisation ne reflète que partiellement l'importance relative des voies d'introduction
- ☐ Élevée, je n'ai pas assez d'éléments pour formuler un jugement fiable

Commentaires

Risque de diffusion

En Corée du Sud, on admet 100 possibles évènements de diffusion d'un district présentant des foyers de DNC à un autre. Compte tenu des éléments présentés dans le document de synthèse et de votre expertise, répartissez ces 100 évènements en fonction des voies de diffusion qui vous semblent les plus ou moins probables de survenir. Si vous ne savez pas, ou êtes dans l'incapacité de répondre, veuillez cocher la case « Je suis dans l'incapacité de répondre ».

Diffusion par le transport de bovins infectés entre les fermes des districts (et des vecteurs infectés transportés avec les bovins) :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Diffusion par le transport de bovins infectés via le réseau de marchés de bovins vivants

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Diffusion par le transport de bovins infectés vers un abattoir :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Diffusion locale par le vol de vecteurs infectés :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Diffusion par le transport d'un vecteur infecté via le transport de chevaux entre fermes des districts :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

Diffusion par le transport d'un vecteur infecté via le transport de chevaux vers un abattoir :

Veuillez remplir le nombre d'introductions correspondant

☐ Je suis dans l'incapacité de répondre

Quel niveau d'incertitude associez-vous à vos réponses

- ☐ Très faible, je suis très confiant dans ma hiérarchisation des voies
- ☐ Modérée, il est possible que ma hiérarchisation ne reflète que partiellement l'importance relative des voies de diffusion
- ☐ Élevée, je n'ai pas assez d'éléments pour formuler un jugement fiable

Commentaires

SOUMETTRE

Annexe 3 : Calculs

1. Calcul du poids des voies de risques

Valeurs des niveaux d'incertitude :

- * Incertitude élevée : $y = 1$
- * Incertitude moyenne : $y = 2$
- * Incertitude faible : $y = 3$

Pour chaque voie v d'introduction et de diffusion, il est fait :

$$P_v = \frac{\sum_{e=1}^n x_{e,v} y_{e,v}}{\sum_{e=1}^n y_{e,v}}$$

- où
- P_v = poids calculé de la voie
 - e = l'ensemble des experts
 - $x_{e,v}$ = poids de la voie attribué par l'expert
 - $y_{e,v}$ = niveau d'incertitude de la réponse de l'expert

Annexe 4 : Matrice de risque

Densité de bovins	Score de risque				
	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très Élevé
Très faible	Très faible	Faible	Faible	Modéré	Modéré
Faible	Faible	Faible	Modéré	Modéré	Élevée
Moyen	Faible	Modéré	Modéré	Élevée	Élevée
Élevée	Modéré	Modéré	Élevée	Élevée	Très Élevée
Très Élevée	Modéré	Élevé	Élevé	Très Élevée	Très Élevée

Annexe 5 : Analyse de sensibilité

Méthode :

Pour réaliser l'analyse de sensibilité, les cartes finales de risques ont été recalculées en variant le poids relatif des différentes voies. Ces nouveaux poids sont déterminés en fonction de l'écart-type des poids obtenus par l'élicitation d'experts. Ainsi, pour chaque voie d'introduction et de diffusion, l'écart type est additionné au poids estimé par la consultation d'expert. Les poids des autres voies sont ensuite ajustés afin qu'ils restent proportionnels entre eux, et que la somme des poids de toutes les voies soit égal à 100. La même méthode est répétée en soustrayant cette fois l'écart type. Ainsi pour les scénarios d'introduction, 10 tests de sensibilité ont été testés et 12 par scénario de diffusion. Les risques finaux par districts sont ensuite comparés.

Résultats :

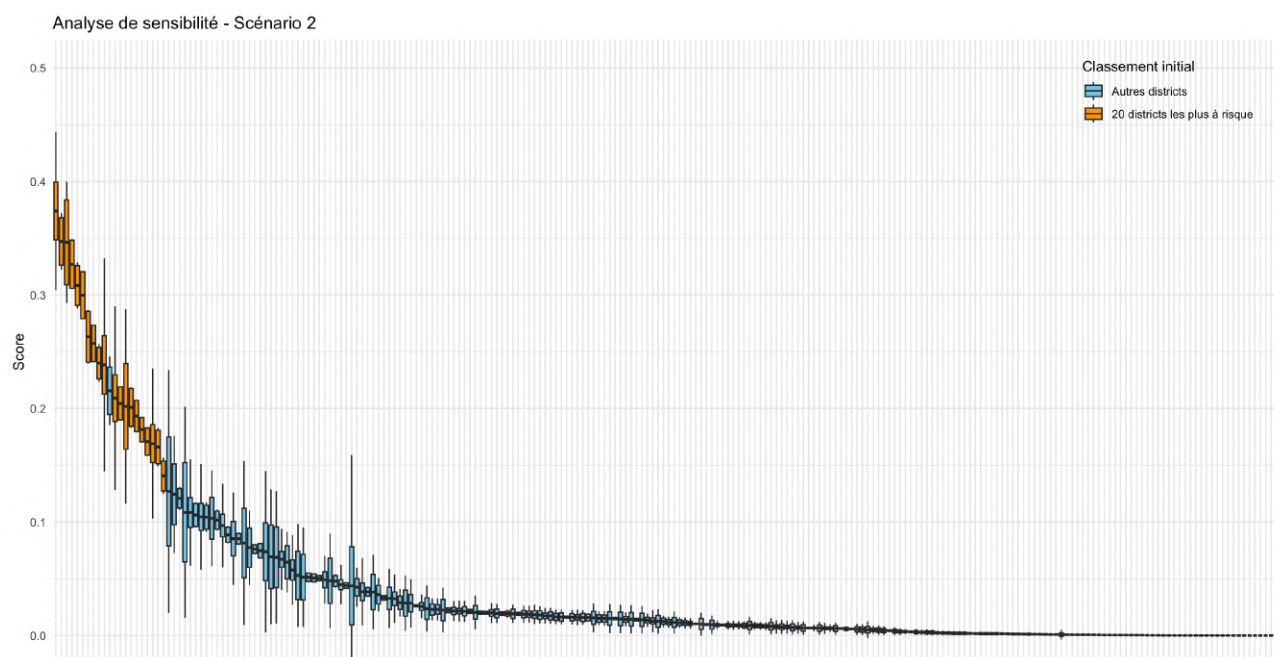
Introduction scénario 1

District	Rang initial	Rang min	Rang max	Toujours top 20
41800	1	1	11	TRUE
44270	2	1	5	TRUE
42760	3	1	229	FALSE
52800	4	2	11	TRUE
41590	5	3	8	TRUE
44210	6	3	12	TRUE
41220	7	6	9	TRUE
52210	8	5	17	TRUE
44800	9	7	16	TRUE
44200	10	8	13	TRUE
11470	11	2	228	FALSE
46870	12	10	25	FALSE
44810	13	12	16	TRUE
41480	14	6	23	FALSE
52130	15	11	30	FALSE
44180	16	12	29	FALSE
52140	17	15	27	FALSE
52790	18	16	33	FALSE
46860	19	17	34	FALSE
44825	20	18	35	FALSE

Introduction scénario 2

District	Rang initial	Rang min	Rang max	Toujours top 20
44270	1	1	5	TRUE
52800	2	2	11	TRUE
44210	3	3	12	TRUE
41590	4	3	8	TRUE
41800	5	1	11	TRUE
52210	6	5	17	TRUE
41220	7	6	9	TRUE
44800	8	7	16	TRUE
44200	9	8	13	TRUE
42760	10	1	229	FALSE
46870	11	10	25	FALSE

52130	12	11	30	FALSE
44810	13	12	16	TRUE
44180	14	12	29	FALSE
52140	15	15	27	FALSE
52790	16	16	33	FALSE
41480	17	6	23	FALSE
44825	18	18	35	FALSE
46860	19	17	34	FALSE
44770	20	20	39	FALSE



Score de risque des districts après analyse de sensibilité pour le scénario 2. En jaune sont représentés les 20 districts les plus à risque de la carte de risque de base. En bleu sont les autres districts.

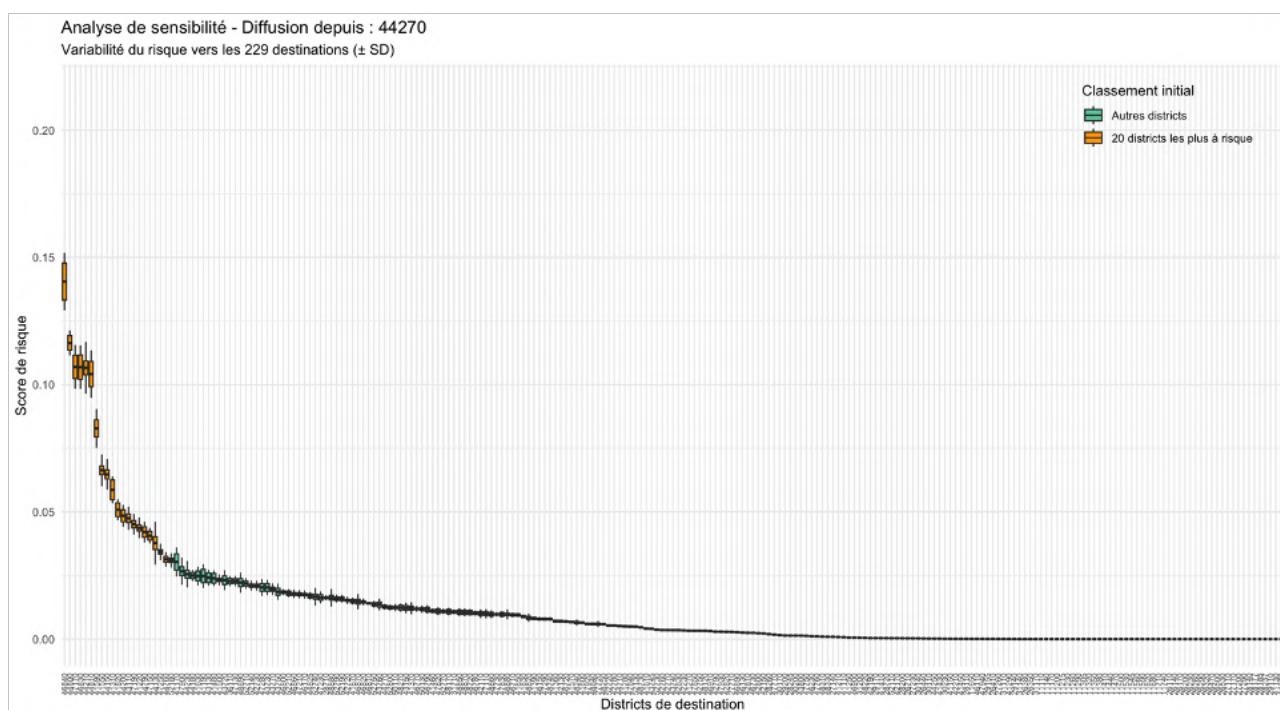
Diffusion : District 52140

District	Rang initial	Rang min	Rang max	Toujours top 20
46860	1	1	7	TRUE
41190	2	1	18	TRUE
52710	3	1	6	TRUE
52180	4	2	8	TRUE
44230	5	3	9	TRUE
52210	6	3	9	TRUE
41170	7	3	21	FALSE
52790	8	5	9	TRUE
44760	9	5	12	TRUE
46900	10	4	30	FALSE
44150	11	13	13	TRUE
52770	12	20	20	TRUE
44800	13	14	14	TRUE
46910	14	46	46	FALSE
44790	15	16	16	TRUE
43110	16	17	17	TRUE
47250	17	19	19	TRUE
44770	18	22	22	FALSE

41550	19	23	23	FALSE
44810	20	24	24	FALSE

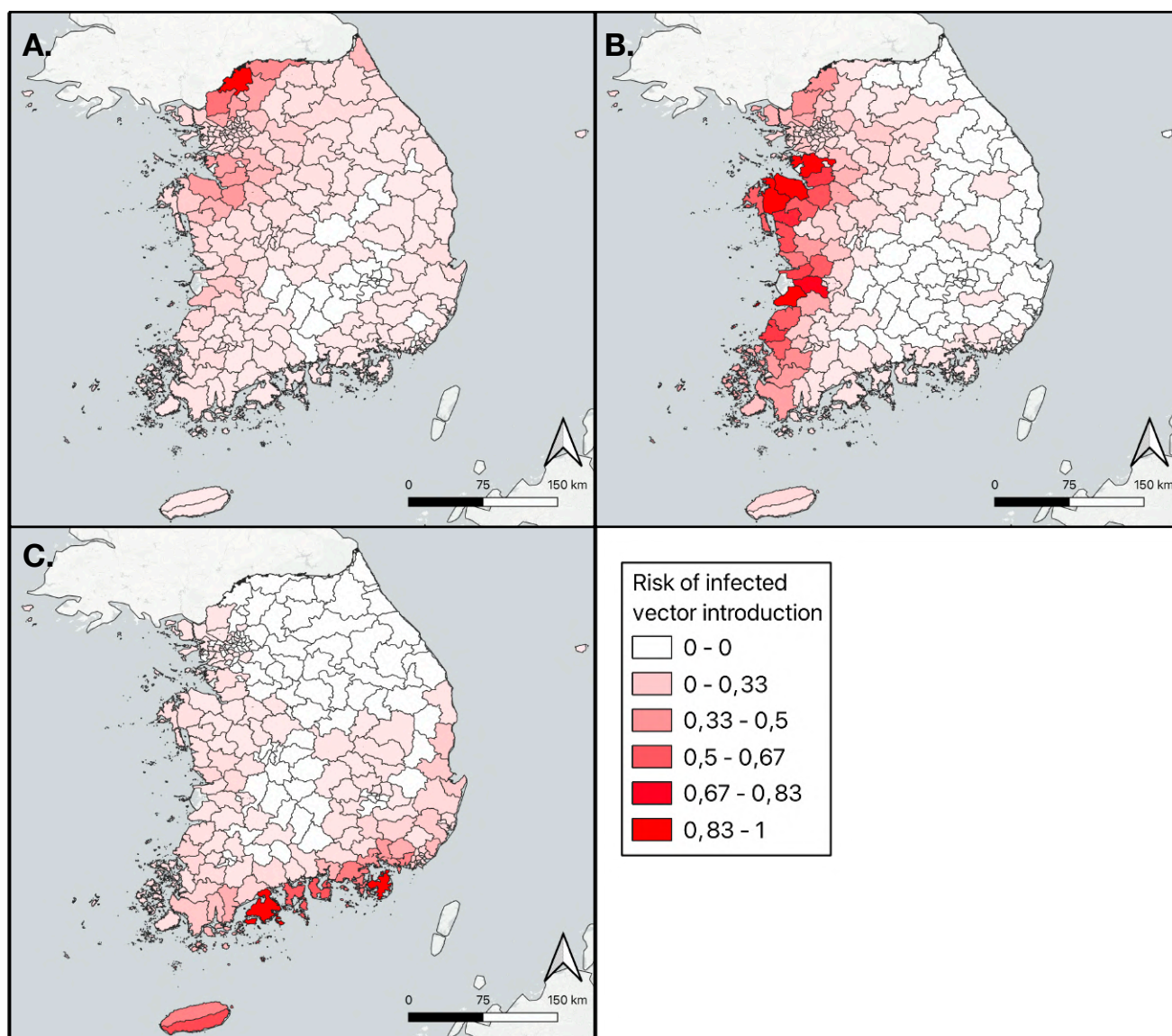
Diffusion : District 44270

District	Rang initial	Rang min	Rang max	Toujours top 20
46840	1	1	7	TRUE
44800	2	1	5	TRUE
47170	3	2	8	TRUE
46830	4	2	11	TRUE
44210	5	2	6	TRUE
44810	6	2	6	TRUE
41590	7	4	9	TRUE
41550	8	5	10	TRUE
44150	9	6	11	TRUE
41310	10	7	37	FALSE
41820	11	8	34	FALSE
44200	12	9	17	TRUE
43110	13	10	15	TRUE
47190	14	12	16	TRUE
41220	15	12	18	TRUE
44790	16	13	19	TRUE
47150	17	12	27	FALSE
44130	18	14	19	TRUE
47250	19	15	21	FALSE
44760	20	18	24	FALSE



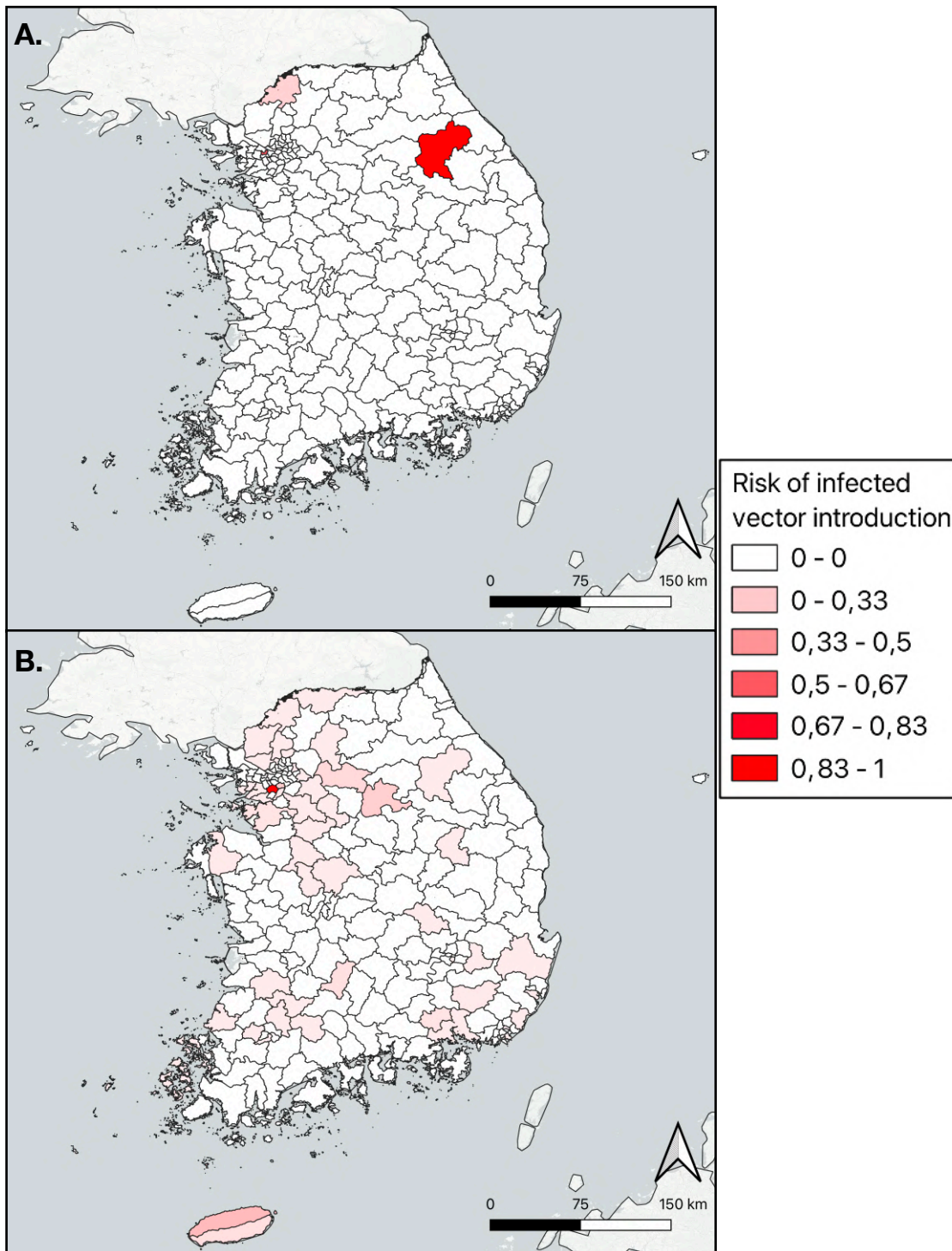
Score de risque de diffusion du district 44720 après analyse de sensibilité. En jaune sont représentés les 20 districts les plus à risque de la carte de risque de base. En bleu sont les autres districts.

Annexe 6 : Cartes du risque d'introduction de vecteurs par les vents



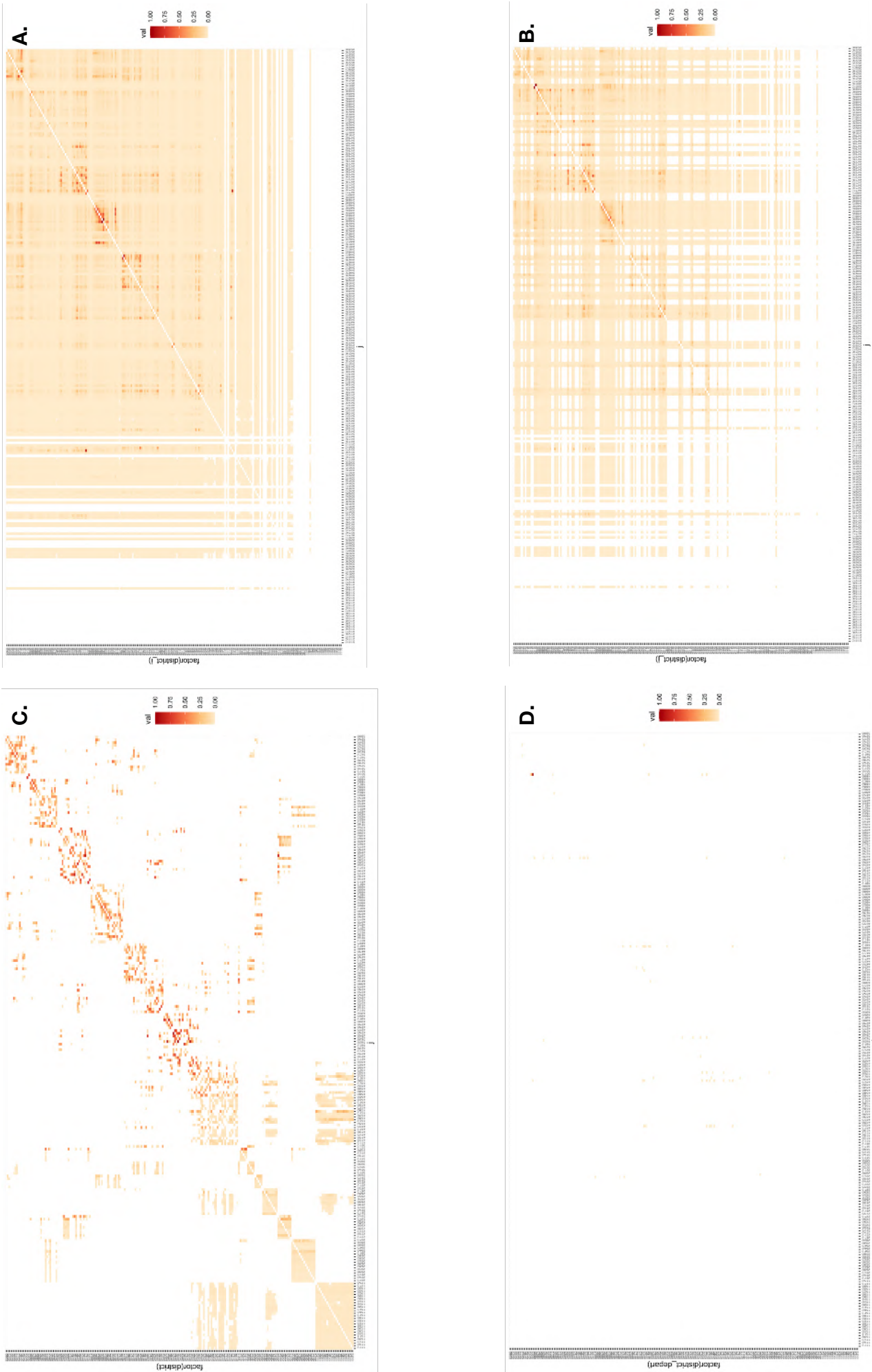
A. Risque d'introduction de vecteurs par les vents en provenance de Corée du Nord. **B.** Risque d'introduction de vecteurs par les vents en provenance de Chine. **C.** Risque d'introduction de vecteurs par les vents en provenance du Japon.

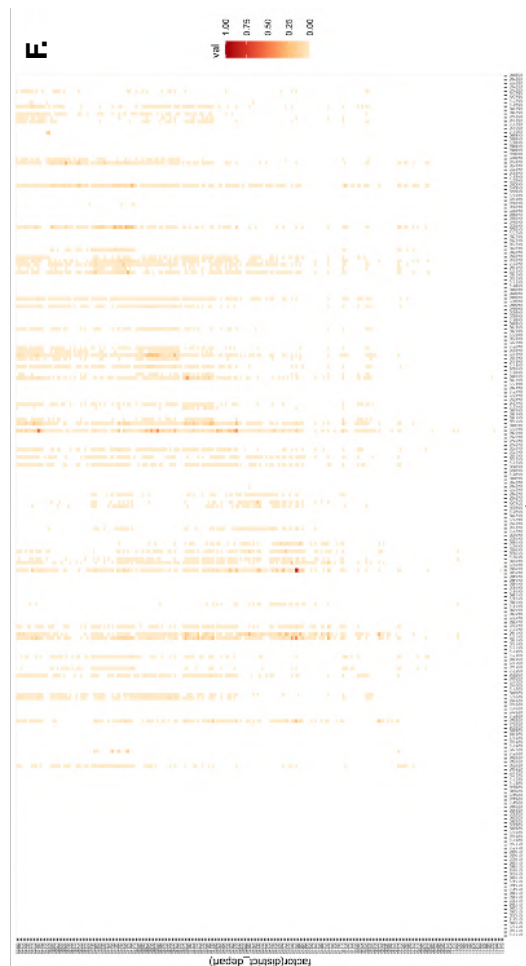
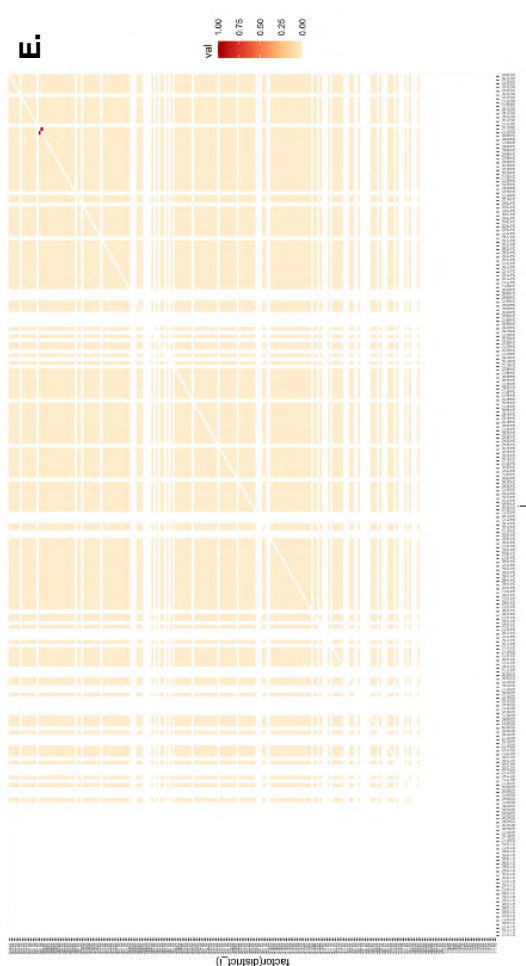
Annexe 7 : Cartes du risque d'importation de bovins infectés ou de vecteurs infectés avec les chevaux



A. Carte du risque d'importation de bovins infectés en Corée du Sud. **B.** Carte du risque d'importation de vecteurs infectés transportés avec les chevaux.

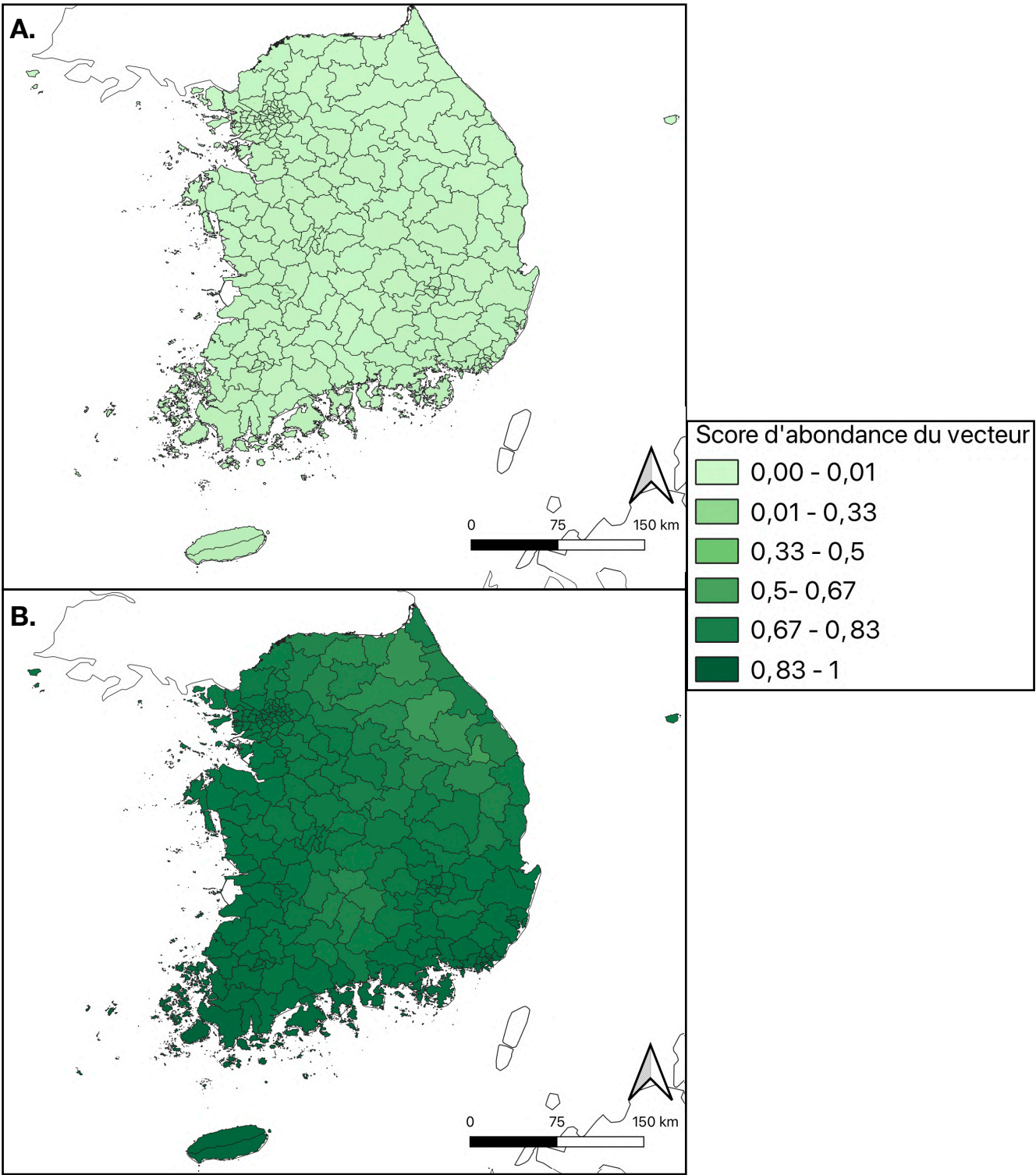
Annexe 8 : Matrices des scores du risque des voies de diffusion





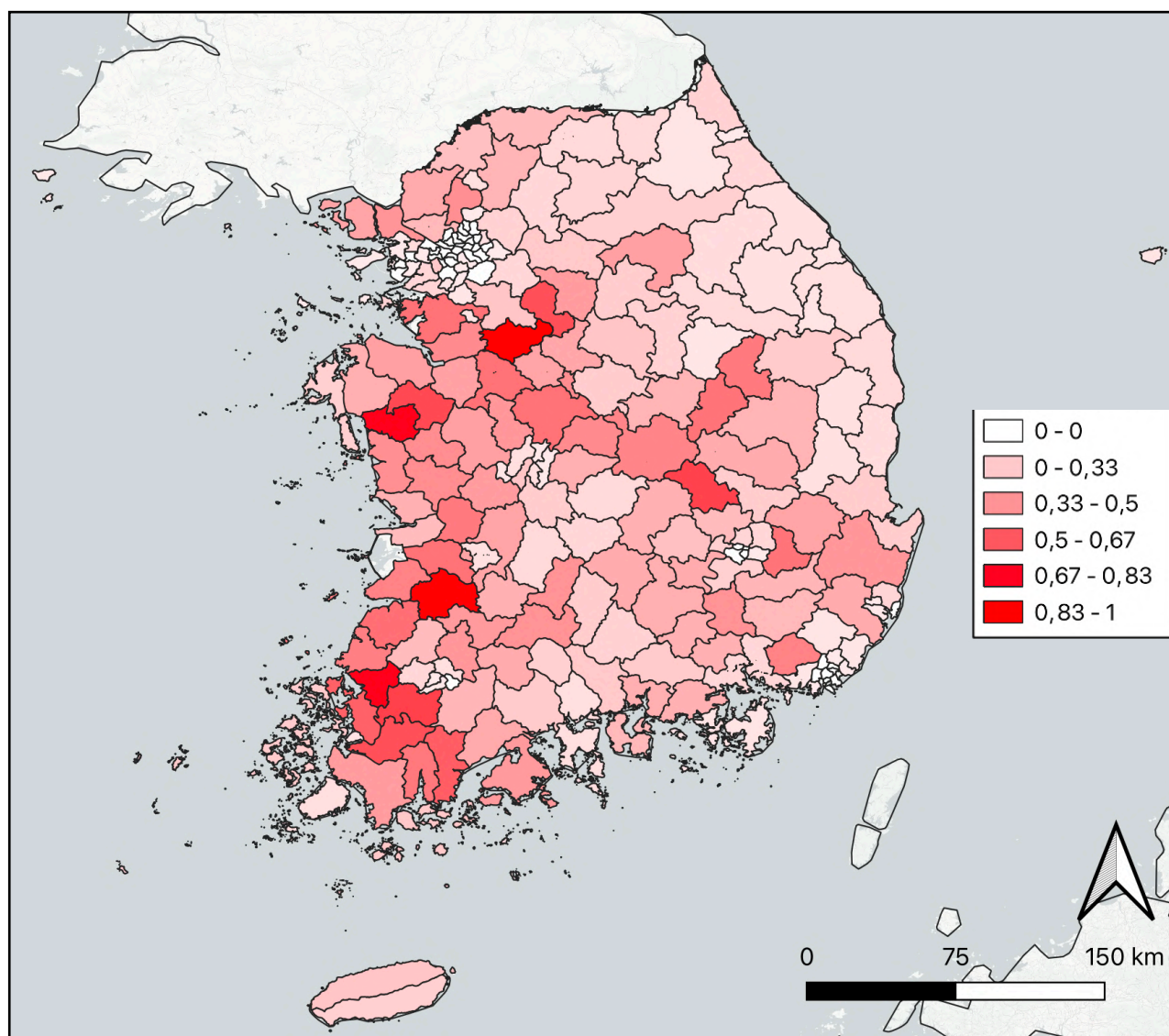
A. Matrice pour les transports de bovins entre les fermes. **B.** Matrice pour les transports de bovins liés aux marchés. **C.** Matrice des vols à courtes distance des vecteurs. **D.** Matrice des transports des chevaux vers les abattoirs. **E.** Matrice des transports de chevaux entre les fermes. **F.** Matrice des transports des bovins vers abattoirs.

Annexe 9 : Cartes des scores d'abondance des vecteurs



A. Score d'abondance pour la période de faible activité (Novembre à Avril). **B.** Score d'abondance pour la période de haute activité (Mai à Octobre)

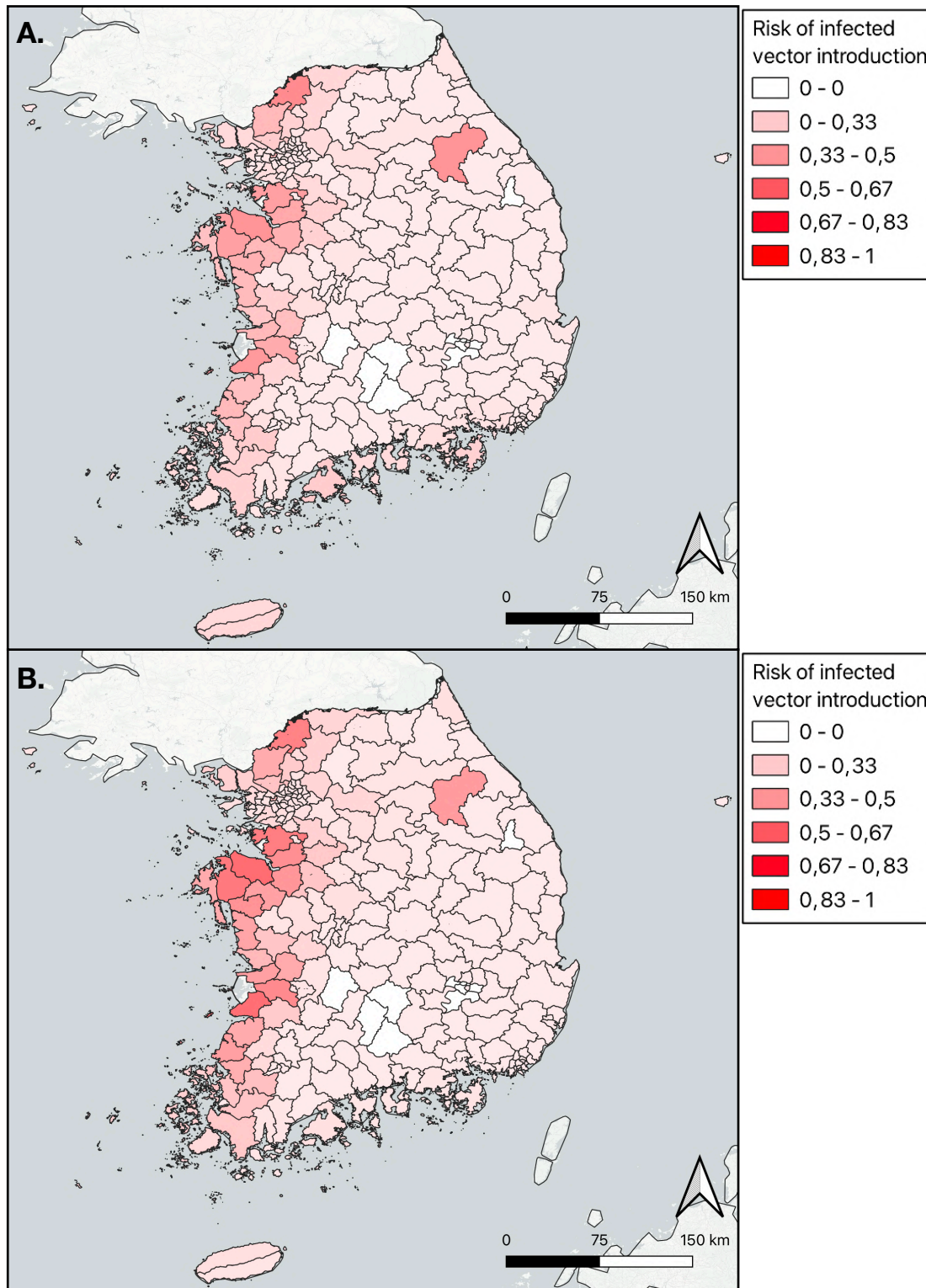
Annexe 10 : Carte de la densité de bovins en Corée du Sud



Annexe 11 : Tables des poids et de l'incertitude attribués par les experts pour les voies d'introduction et de diffusion de la DNC en Corée du Sud

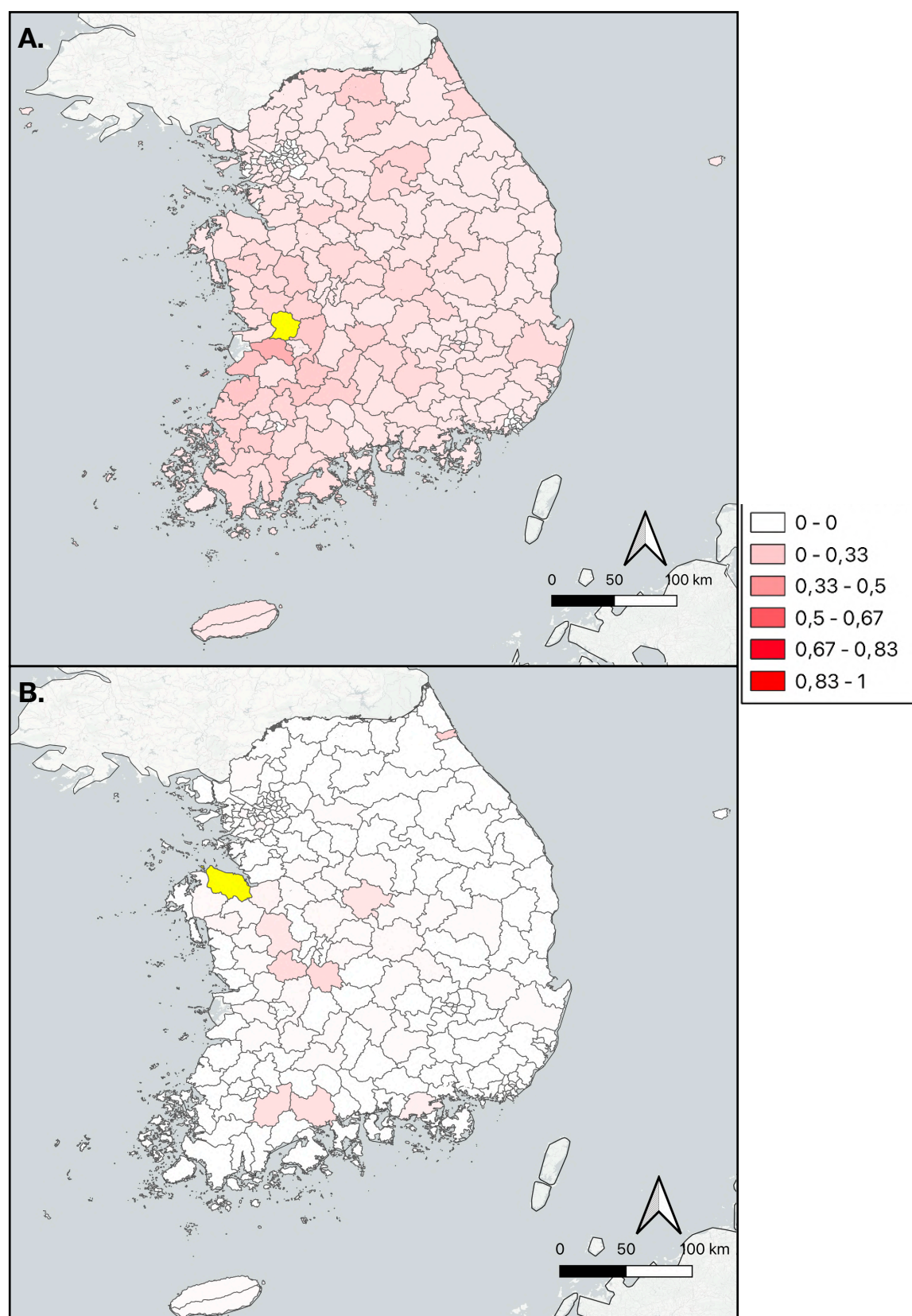
Risque d'introduction - Scénario 1	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6
Import de bovins infectés et de leurs vecteurs	5	90	10	70	10	1
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance de Chine	35	2	50	15	30	50
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance du Japon	15	1	10	10	20	20
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance de Corée du Nord	45	2	30	5	35	29
Transport de vecteurs infectés avec l'import de chevaux	0	5	0	0	5	0
Incertitude	Elevée	Moyenne	Élevée	Élevée	Élevée	Moyenne
Risque de diffusion	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6
Transport de bovins entre les fermes	40	30	30	50	20	30
Transport de bovins liés aux marchés	40	30	20	20	20	20
Transport de bovins vers les abattoirs	5	15	10	20	30	5
Diffusion des vecteurs à courte distance	10	20	40	10	20	45
Transport des vecteurs avec les chevaux entre les fermes	5	3	0	0	5	0
Transport des vecteurs avec les chevaux vers les abattoirs	0	2	0	0	5	0
Incertitude	Élevée	Moyenne	Élevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Risque d'introduction - Scénario 2	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6
Import de bovins infectés et de leurs vecteurs	5	90	10	70	10	1
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance de Chine	40	3	55	25	50	74
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance du Japon	5	0	0	0	0	5
Introduction de vecteurs infectés par les vents en provenance de Corée du Nord	50	2	35	5	35	20
Transport de vecteurs infectés avec l'import de chevaux	0	5	0	0	5	0
Incertitude	Élevée	Moyenne	Élevée	Élevée	Élevée	Faible

Annexe 12 : Cartes brutes de risque d'introduction



(A) Carte brute du risque d'introduction dans la situation où la Chine et le Japon rapportent des cas et où la situation est inconnue pour la Corée du Nord. (B) Carte brute du risque d'introduction dans la situation où la Chine rapporte des cas, mais pas le Japon et où la situation est inconnue pour la Corée du Nord.

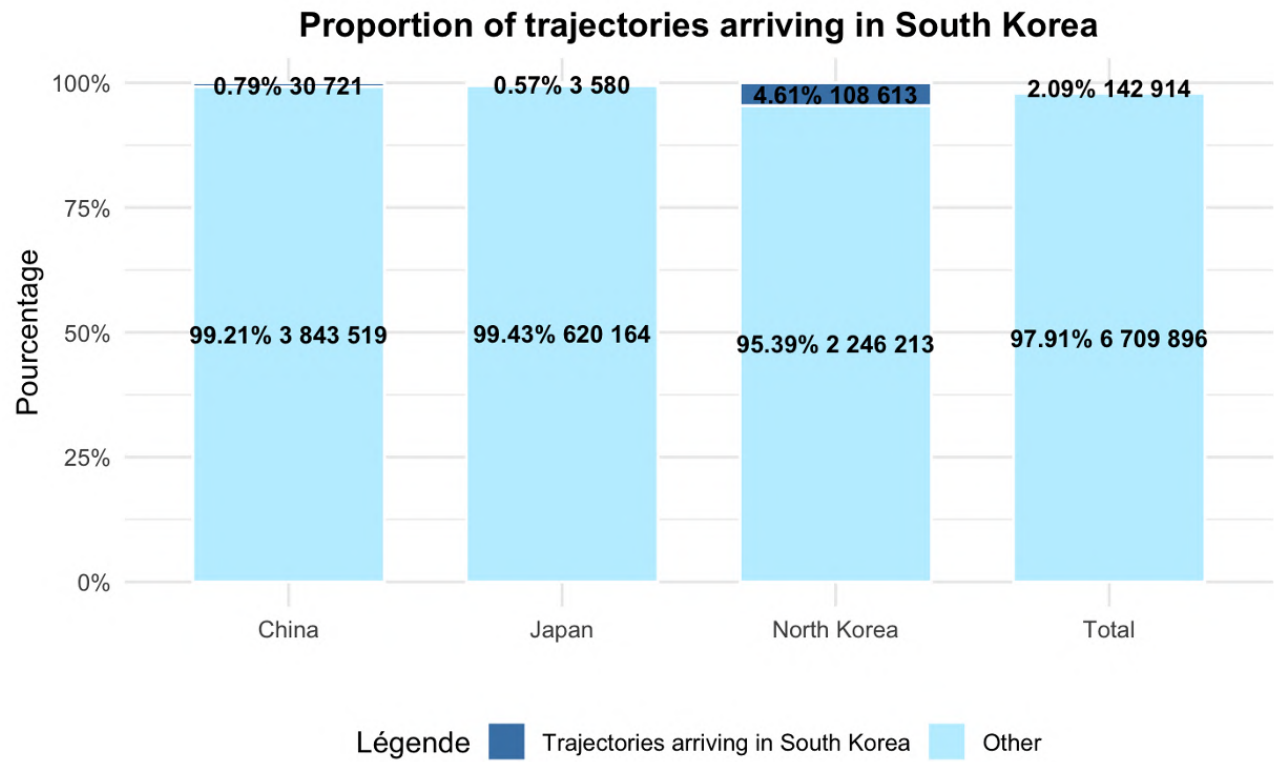
Annexe 13 : Cartes brutes de risque de diffusion



(A). Carte brute de diffusion depuis le district 52140, représenté en jaune sur la carte. (B). Carte brute de diffusion depuis le district 44720, représenté en jaune sur la carte.

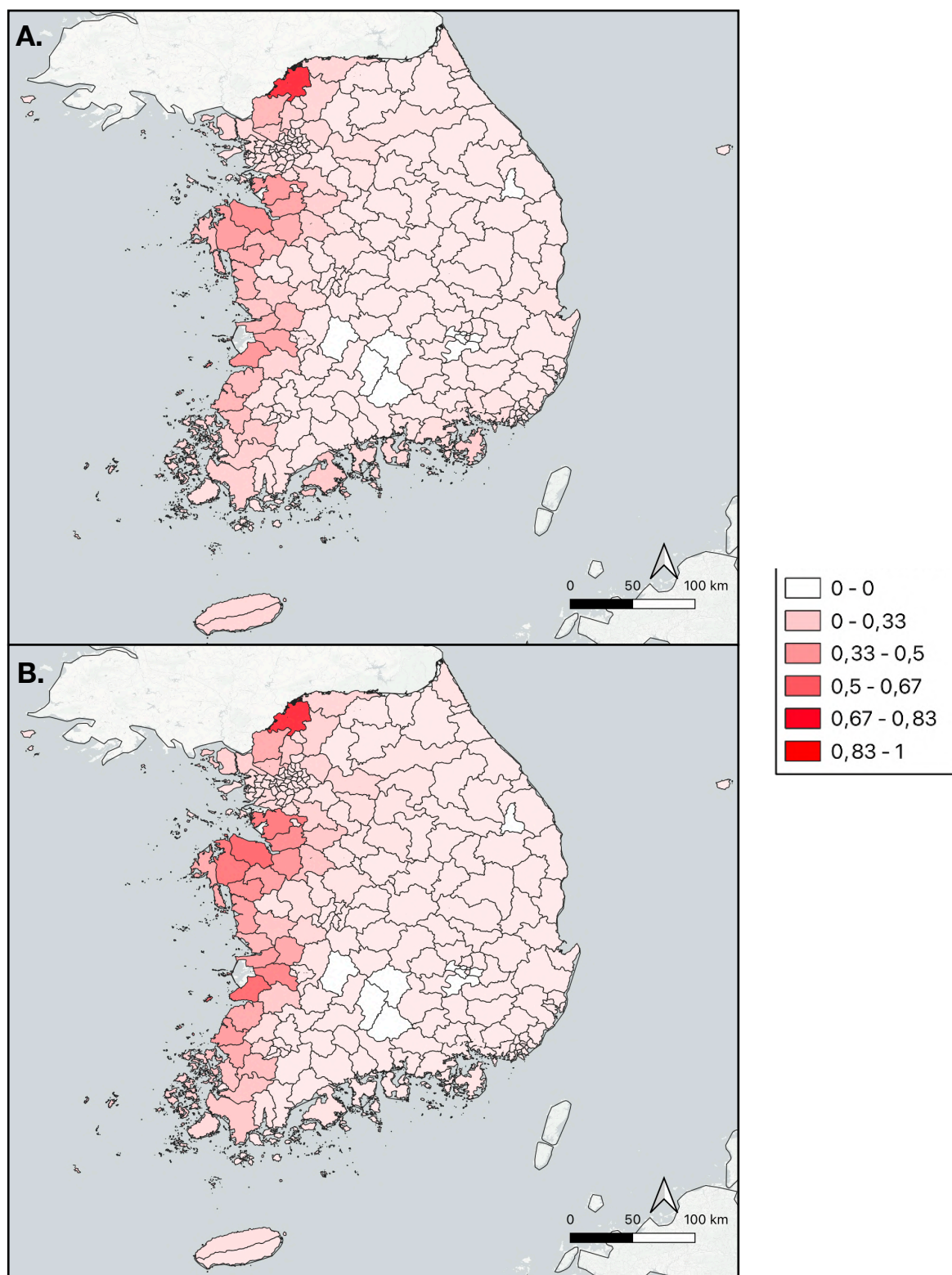
Annexe 14 : Résultats analyse *Forward* Tropolink

Proportions des trajectoires modélisées lors de l’analyse *Forward* qui arrivent en Corée du Sud. En bleu foncé sont représentées les trajectoires qui arrivent en Corée du Sud et en bleu clair, celles qui n’arrivent pas en Corée du Sud.



Annexe 15 : Cartes d'introduction brutes bis

Cartes brutes recrée mais en omettant les données d'importation de bovins considérées comme exceptionnelles.



(A) Carte d'introduction brut bis pour le scénario 1. (B) Carte d'introduction brut bis pour le scénario 2

Annexe 16 : Températures moyennes mensuelles par districts en Corée du Sud

