

# Les déterminants des maladies infectieuses humaines en Europe : influences de la biodiversité et de la variabilité climatique

Serge Morand (serge.morand@univ-montp2.fr)<sup>1</sup>, Agnès Waret-Szkuta<sup>2</sup>

1/ Institut des sciences de l'évolution, CNRS, IRD, Université Montpellier 2, CC065; Cirad UR AGIRs, TA C-22/E, Montpellier, France  
2/ Cirad UR AGIRs, TA C-22/E, Montpellier, France ; ENVT, Clinique aviaire et porcine, Toulouse, France

## Résumé / Abstract

L'incidence des maladies infectieuses est en nette augmentation ces dernières décennies. Les facteurs évoqués sont généralement ceux associés aux changements globaux en cours dont le changement climatique, l'érosion de la biodiversité et l'augmentation des échanges internationaux. Dans cette étude, nous analysons les facteurs potentiellement explicatifs des épidémies (au sens de l'OMS) de maladies infectieuses humaines à l'échelle européenne. Pour cela, une base de données incluant des variables socioéconomiques, environnementales et de biodiversité pour chacun des pays, ainsi que les principales maladies infectieuses humaines qui y sont rapportées, est constituée.

Sur la période 1950 à 2010, on compte 114 maladies infectieuses épidémiques réparties dans 36 pays. Ces données confirment l'augmentation quasi-exponentielle du nombre de maladies infectieuses épidémiques au cours des dernières décennies. Le nombre total de maladies répertoriées dans les pays européens apparaît corrélé à la surface géographique du pays et à sa biodiversité (richesse en espèces d'oiseaux et mammifères). Cela reste vrai pour le nombre total de maladies épidémiques, qui se trouve en outre dépendre de la taille de la population, de la variabilité de la température et de la richesse économique (PIB) du pays considéré. L'effet de l'Oscillation Nord-Atlantique (NOA, *North Atlantic Oscillation*) comme indice de la variabilité climatique en Europe est testé pour 13 maladies infectieuses analysables sur les soixante dernières années. Onze maladies infectieuses présentent des occurrences associées aux variations mensuelles de l'indice NOA comme les fièvres hémorragiques à hantavirus, la tularémie, les fièvres Q, la trichinose ou les maladies infectieuses gastro-intestinales à bactéries ou à virus.

Cette étude souligne l'intérêt potentiel du suivi des changements de biodiversité ou de la variabilité climatique pour les systèmes d'alerte précoce en épidémiologie.

## Determinants of human infectious diseases in Europe: biodiversity and climate variability influences

*Infectious diseases' incidence has clearly increased during the last decades. The explanatory factors reported are generally those associated with ongoing global changes, including climate change, loss of biodiversity, and increased international trade. In this study, we analyze the potential explanatory factors of human infectious disease outbreaks across European countries (as defined by the WHO). For this purpose, a database including data about socio-economical, environmental and biodiversity related factors, as well as the main human infectious diseases reported was designed.*

*Over the period 1950 to 2010, 114 epidemic infectious diseases were identified in 36 countries. These data confirm the almost exponential increase in the number of infectious disease outbreaks in recent decades. The total number of diseases listed in any given European country seems to be correlated to its area size and biodiversity (species richness in birds and mammals). The total number of epidemic diseases is found to also depend on the population size and economic wealth (GDP) of the country, as well as on the prevailing temperature variability. The effect of the North Atlantic Oscillation (NAO) considered as an index of climate variability in Europe is tested for thirteen infectious diseases which can be analyzed over the last 60 years. The occurrence of 11 of these, including hantavirus hemorrhagic fevers, tularaemia, Q fever, trichinosis and bacterial or viral gastrointestinal diseases, is found to be associated with monthly variations of NAO.*

*This study highlights that both biodiversity change and climate variability should be taken into account when building epidemic-surveillance early warning systems.*

## Mots-clés/Key words

Europe, maladies infectieuses, épidémie, biodiversité, variabilité climatique, index NAO / Europe, infectious diseases, epidemic, biodiversity, climate variability, NAO index

## Introduction

L'incidence des maladies infectieuses est en nette augmentation ces dernières décennies [1]. Les facteurs explicatifs invoqués sont généralement ceux associés aux changements globaux en cours dont le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, les invasions biologiques et l'augmentation des échanges internationaux. Un impact direct du changement climatique sur les maladies infectieuses est cependant difficile à démontrer en raison des interactions complexes non linéaires entre climat et biodiversité, agents pathogènes, vecteurs et hôtes [2]. Ainsi, le changement climatique est supposé impacter plus particulièrement les maladies infectieuses vectorielles [1;3], mais une réduction de la biodiversité à l'échelle locale peut d'autre part s'accompagner d'une augmentation des prévalences de certaines maladies, comme cela a été montré pour la maladie de Lyme ou la fièvre du West Nile par exemple [4].

La majorité des maladies infectieuses émergentes semble localisée dans les latitudes élevées et dans les pays développés (Amérique du

Nord, Europe, Japon) [1]. On trouve un schéma opposé pour la richesse (nombre total) en maladies endémiques lors de recherches sur les facteurs explicatifs, leur diversité apparaissant plus élevée dans les zones tropicales où la biodiversité en oiseaux et en mammifères est la plus élevée [5;6].

Les conséquences du changement climatique en Europe ont fait l'objet de nombreuses synthèses [7] et quelques travaux ont pu effectivement démontrer un effet du changement climatique sur des maladies infectieuses, comme dans le cas de la maladie de la fièvre catarrhale ovine [8]. Cependant, peu d'études ont abordé d'une manière comparative l'impact du changement climatique sur les maladies infectieuses [9] et un très petit nombre d'études ont exploré les liens entre variabilité climatique et épidémies en Europe [10;11].

Les contradictions apparentes entre les études conduites à l'échelle mondiale sur les localisations géographiques et les déterminants des maladies infectieuses humaines endémiques et épidémiques, ainsi que le manque de vision

plus spécifiquement centrée sur l'Europe, nous a conduit à analyser les facteurs potentiellement explicatifs des épidémies de maladies infectieuses humaines à l'échelle de ces pays européens. Pour cela, une base de données incluant des données socioéconomiques, environnementales et de biodiversité, ainsi que les principales maladies infectieuses humaines répertoriées par pays et servant sous forme épidémique, a été constituée. Ceci a permis de tester statistiquement l'influence de facteurs potentiels explicatifs de ces épidémies (au sens de l'OMS : augmentations significatives de nombre de cas ou de foyers de maladies), en y incluant la variabilité climatique.

## Méthodes

Les informations concernant les épidémies de maladies infectieuses proviennent de la base médicale GIDEON<sup>1</sup> (*Global Infectious Diseases and Epidemiology Network*). Cette base de données, qui fournit la présence et l'occurrence sous forme

<sup>1</sup> <http://www.cyinfo.com>

épidémique éventuelle des maladies infectieuses humaines pour chaque pays, a régulièrement été utilisée dans des études comparatives [5;6]. Elle est complétée par des données socioéconomiques, démographiques et environnementales provenant de la FAO et de la Banque mondiale : démographie, PIB, superficie des forêts, température et pluviométrie moyennes ainsi que leurs variabilités annuelles. Y sont également ajoutées des données de biodiversité provenant de *Bird Life International*<sup>2</sup> pour les oiseaux et de *International Union for Conservation of Nature* pour les mammifères<sup>3</sup>.

Sur la période 1950 à 2010 et à l'échelle de 36 pays, 114 maladies infectieuses épidémiques sont ainsi répertoriées.

L'impact de la variabilité climatique sur les épidémies est analysé en utilisant l'indice de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO, *North Atlantic Oscillation*), car cet index est plus pertinent pour l'Europe que l'ENSO (*El Niño Southern Index*). Les phases positives et négatives du NAO reflètent les patrons climatiques de température et de pluviométrie sur l'Europe. Les données sur les variations mensuelles de cet indice proviennent de la NOAA<sup>4</sup> (*National Weather Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration*) et sont incorporées dans des modèles de régression logistique avec l'année comme variable confondante. La base GIDEON a été mise en place en 1994, et certaines informations remontent au début du siècle précédent.

Treize maladies infectieuses sont ensuite sélectionnées sur la base de leur détection remontant au moins au début des années 1950, de manière à obtenir une série statistique suffisamment longue de 1950 à 2009. Le choix des années 1950 comme début de la série statistique s'explique également par une amélioration significative de la mise en place d'autres bases de données (socioéconomiques par exemple : FAO, Banque mondiale, FMI) qui ont commencé à fournir des informations agrégées par pays à partir des années 1950.

Les statistiques, modèles de régression multiples ou modèles linéaires généralisés, sont effectuées sous R 2.10<sup>®</sup> (*R Development Core Team*, 2010). Les sélections des meilleurs modèles se font à l'aide du critère AIC (*Akaike Information Criteria*).

## Résultats

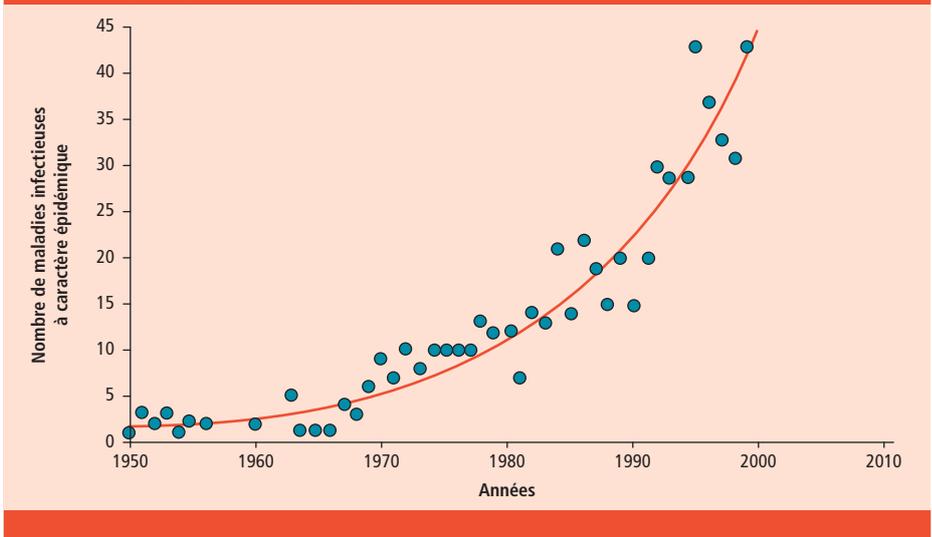
### Augmentation du nombre d'épidémies

Les données issues de la base GIDEON confirment l'augmentation quasi-exponentielle du nombre de maladies infectieuses humaines produisant des épidémies au cours des dernières décennies (figure 1).

### Déterminants de la diversité des maladies infectieuses humaines présentes en Europe et de celles prenant une forme épidémique

Nous avons conduit deux analyses de régression multiple, avec sélection du meilleur modèle par le critère AIC, afin de mettre en évidence les

Figure 1 Augmentation du nombre de maladies infectieuses à caractère épidémique depuis les années 1950 en Europe | *Figure 1 Increase in epidemic infectious diseases since the 1950s in Europe*



facteurs statistiquement explicatifs de la richesse totale en maladies infectieuses humaines totales d'une part et épidémiques d'autre part.

Concernant le nombre total de maladies infectieuses en Europe, le meilleur modèle inclut la superficie des pays ainsi que la richesse en oiseaux et en mammifères (tableau 1). Il apparaît qu'un pays de grande superficie avec une forte biodiversité (en oiseaux et en mammifères) présenterait une forte diversité en maladies infectieuses. Une forte biodiversité est donc statistiquement un facteur corrélatif important de la diversité des maladies infectieuses humaines (figure 2).

Le nombre de maladies infectieuses épidémiques est potentiellement expliqué par davantage de facteurs. Outre la superficie du pays et sa biodiversité, la densité de population et la richesse économique (PIB) y sont aussi statistiquement positivement corrélées et la variabilité annuelle de température négativement, soulignant l'importance de la variabilité climatique par rapport à l'occurrence des épidémies.

### Effet de la variabilité climatique

L'influence de facteurs environnementaux, comme la température, dans l'explication statistique du nombre de maladies infectieuses à caractère épidémique, conduit à poursuivre l'analyse en abordant l'importance de la variabilité climatique sur l'occurrence des épidémies de

13 des 114 maladies infectieuses répertoriées au long des soixante dernières années.

Toutes les 13 montrent une association statistique positive avec le facteur année (tableau 2), reflétant la tendance déjà notée précédemment d'une augmentation du nombre de maladies épidémiques de l'année 1950 à l'année 2009 (figure 1).

Six d'entre elles montrent une association significative avec l'index NAO mensuel. Il s'agit des infections à adénovirus, de la fièvre Q, des infections à entérovirus, des fièvres typhoïdes, de la tularémie et de la trichinellose. Trois autres maladies montrent une tendance liée à la variabilité climatique : les méningites aseptiques virales, les gastro-entérites et les fièvres hémorragiques à hantavirus. Enfin, quatre maladies infectieuses semblent être indépendantes de la variabilité climatique. Il s'agit de la rougeole, de la tuberculose, des hépatites A et des shigelloses.

## Discussion

Les résultats présentés ici, bien que focalisés sur les pays européens, sont en accord avec les analyses menées à l'échelle mondiale [1]. Ainsi, la biodiversité serait un facteur explicatif de la diversité des maladies infectieuses humaines. Un pays européen hébergeant une forte biodiversité en oiseaux et en mammifères hébergerait également de nombreux vecteurs et réservoirs qui constituent les éléments essentiels de

Tableau 1 Résultats synthétiques à l'aide de modèles généraux de régressions des facteurs explicatifs du nombre de maladies infectieuses totales et épidémiques en Europe (les meilleurs modèles sont sélectionnés à l'aide du critère AIC) (voir aussi figure 2) | *Table 1 Summarized results of explanatory factors of present and epidemic infectious diseases in Europe using general regression modelling (the best fit models were selected using the AIC criterion) (see also figure 2).*

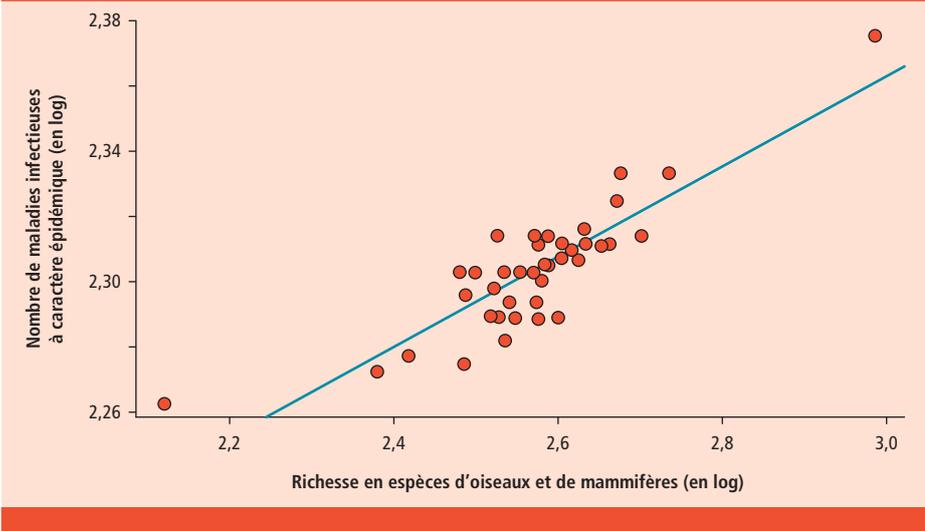
Maladies infectieuses	Variables explicatives	Effet	Probabilité
Nombre de total de maladies infectieuses	Superficie du pays	+	0,02
	Richesse en espèces d'oiseaux et mammifères	+	<0,0001
Nombre de maladies infectieuses épidémiques	Superficie du pays	+	0,004
	Densité de population	+	0,01
	Nombre de maladies infectieuses totales	-	0,029
	Richesse en espèces d'oiseaux et mammifères	+	0,003
	PIB <i>per capita</i>	+	0,0001
	Variabilité annuelle de température	-	0,025

<sup>2</sup> <http://www.birdlife.org>

<sup>3</sup> <http://www.iucnredlist.org/initiatives/mammals>

<sup>4</sup> <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>

**Figure 2** Relation entre le nombre de maladies infectieuses et la richesse en espèces d'oiseaux et de mammifères pour les différents pays européens | *Figure 2* Relationship between the number of infectious diseases and the species diversity in birds and mammals among various European countries



transmission des maladies zoonotiques [6]. La biodiversité serait également un facteur associé à l'augmentation des maladies infectieuses épidémiques.

Ces résultats observés à l'échelle globale ne sont pas en désaccord avec des résultats inverses obtenus à l'échelle locale montrant une augmentation des incidences de maladies infectieuses avec une réduction de la biodiversité [4]. A l'échelle globale, la biodiversité européenne a été marquée par les dernières glaciations qui ont réduit aussi bien la diversité en mammifères [12] que la diversité en parasites [13].

La densité de population qui apparaît aussi comme un déterminant reconnu de la richesse

en agents pathogènes chez les animaux [14] ne semble pas influencer significativement la diversité en agents infectieux des populations européennes.

L'augmentation du nombre de maladies épidémiques en Europe au cours des soixante dernières années confirme également les études effectuées à l'échelle globale [1]. Plusieurs facteurs sont évoqués comme l'urbanisation croissante, l'augmentation des résistances aux antibiotiques ou le changement climatique [7]. Il faut cependant souligner que cette augmentation des maladies à caractère épidémique est fortement corrélée à l'amélioration de la détection des maladies et à l'augmentation des dépenses de santé, reflétée

en partie par l'effet positif du PIB, même si cet indice n'est certainement pas le meilleur indicateur de l'investissement d'un pays dans les systèmes de santé et d'épidémiologie-surveillance. Toutefois, des travaux ont pu montrer qu'il est un bon proxy de nombreux autres indicateurs de santé, comme la mortalité juvénile ou adulte [15].

Cette première analyse du nombre de maladies infectieuses à caractère épidémique ou non doit être considérée comme une première étape pour des travaux futurs. En effet, cette étude n'a pas pris en compte de nombreux autres facteurs, par exemple socioéconomiques, ni la diversité microbiologique et génétique qui peut se cacher derrière le diagnostic d'une maladie.

Un autre point important d'amélioration des études futures concerne l'influence de la variabilité climatique tant sur le nombre total de maladies infectieuses épidémiques que sur l'occurrence de certaines des autres maladies infectieuses répertoriées au cours des dernières décennies.

La variabilité du climat peut avoir un impact direct sur les agents pathogènes (survie dans l'environnement, multiplication...). Nos résultats confirment que les conditions NAO pourraient avoir des implications importantes pour la santé publique européenne en concernant des maladies présentant tous les types de voies de transmission : par les aérosols comme dans le cas des fièvres Q, par l'eau pour les fièvres typhoïdes, par les aliments comme la trichinellose, ou par des insectes vecteurs comme la tularémie. Des effets de la variabilité climatique ont été déjà montrés en Europe sur certaines de ces maladies infectieuses (à l'exception de la trichinellose) [10], et en particulier sur la tularémie en Suède, toutefois sans présenter une claire explication de l'action de la variabilité climatique sur la transmission [16].

L'influence de la variabilité climatique peut agir indirectement par son effet sur les comportements sociaux. Ainsi, l'augmentation des encéphalites à tiques (TBE) (non testée ici) semble être liée à plusieurs facteurs comme l'augmentation de la survie des tiques avec des hivers plus chauds ou l'augmentation des cas diagnostiqués en raison d'une sensibilisation accrue de la maladie, mais aussi en raison d'un plus grand nombre de personnes présentes dans les zones endémiques suite à l'augmentation des activités récréatives [17;18].

L'ensemble de ces résultats est cependant dépendant de la qualité des données utilisées, notamment pour celles qui remontent au milieu du siècle précédent. Le choix de la date de 1950 comme début de la série statistique correspond à cette période d'après-guerre de mise en place des statistiques nationales et internationales (FAO, FMI, Banque mondiale, OMS).

Les implications des résultats présentés ici pour les stratégies d'épidémiologie-surveillance sont de deux ordres. L'effet de la biodiversité sur les maladies infectieuses devrait s'étudier à des échelles plus résolutes, tant géographiques que temporelles.

Ainsi, on pourrait par exemple étudier les relations statistiques entre les modifications d'usage des terres (fragmentation des paysages,

**Tableau 2** Résultats synthétiques des régressions logistiques sur les occurrences des épidémies de 13 maladies infectieuses en fonction des années et valeurs mensuelles de l'index de variabilité climatique NAO (North Atlantic Oscillation) en Europe (les meilleurs modèles sont sélectionnés à l'aide du critère AIC) | *Table 2* Summarized results of logistic regressions on the occurrence of 13 infectious diseases in relation to year and monthly values of the North Atlantic Oscillation (NAO) index of climate variability in Europe (the best fit models were selected using the AIC criterion)

Maladies infectieuses	Variables sélectionnées	Effet estimé (erreur standard)	Probabilité
Infection à adénovirus	Année	0,11 (0,03)	<0,001
	Index NAO du mois de mai	110,32 (56,46)	0,05
Fièvre Q	Année	0,08 (0,02)	0,002
	Index NAO du mois d'octobre de l'année précédente	119,82 (55,20)	0,04
Infection à entérovirus	Année	0,11 (0,03)	<0,001
	Index NAO du mois d'octobre	194,30 (82,11)	0,02
Fièvre typhoïde	Année	0,08 (0,03)	0,001
	Index NAO du mois de décembre de l'année précédente	111,72 (57,94)	0,02
Trichinellose	Année	0,33 (0,11)	0,02
	Index NAO du mois de mai	232,66 (99,19)	0,02
	Index NAO du mois d'août	-357,25 (152,04)	0,02
Gastro-entérite	Année	0,42 (0,15)	0,005
	Index NAO du mois d'octobre	322,54 (171,11)	0,06
Méningite virale	Année	0,08 (0,02)	0,001
	Index NAO du mois d'août	18,71 (64,97)	0,07
Fièvre hémorragique à hantavirus	Année	0,23 (0,08)	0,003
	Index NAO du mois d'avril	207,28 (121,68)	0,08
Tularémie	Année	0,10 (0,03)	0,001
	Index NAO du mois de janvier	-124,74 (58,92)	0,03
Hépatite A	Année	0,05 (0,02)	0,006
Shigellose	Année	0,13 (0,03)	<0,001
Rougeole	Année	0,21 (0,05)	<0,001
Tuberculose	Année	0,25 (0,07)	<0,001

augmentation ou diminution des surfaces forestières) et l'occurrence des épidémies afin de scénariser les effets des changements de biodiversité sur les risques infectieux. D'autre part, l'augmentation continue de la variabilité climatique telle que montrée par l'indice NAO [19] peut potentiellement augmenter les risques épidémiques dans un proche avenir, mais des études plus approfondies sont cependant nécessaires pour proposer son utilisation dans les systèmes d'alerte précoce.

#### Remerciements

Cette étude est supportée par le projet ERA-NET ENHanCe (<http://www.liv.ac.uk/enhance/>) et par l'ATP Cirad « Émergences et risques sanitaires ». Nous remercions K. Owers pour son implication dans la construction de la base de données.

#### Références

[1] Jones KE, Patel NG, Levy MA, Storeygard A, Balk D, Gittleman JL, *et al.* Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*. 2008;451:990-4.  
[2] Lafferty KD. The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology*. 2009;90:888-900.  
[3] Harvell CD, Mitchell CE, Ward JR, Altizer S, Dobson AP, Ostfeld RS, *et al.* Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*. 2002;296: 2158-62.

[4] Keesing F, Belden LK, Daszak P, Dobson A, Harvell CD, Holt RD, *et al.* Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature*. 2010;468:647-52.  
[5] Guernier V, Hochberg ME, Guégan JF. Ecology drives the worldwide distribution of human diseases. *Plos Biol*. 2004;2:740-6.  
[6] Dunn RR, Davies TJ, Harris NC, Gavin MC. Global drivers of human pathogen richness and prevalence. *Proc R Soc B Biol Sc*. 2010;277:2587-95.  
[7] Semenza JC, Menne B. Climate change and infectious diseases in Europe. *Lancet Infect Dis*. 2009;9:365-75.  
[8] Purse BV, Mellor PS, Rogers DJ, Samuel AR, Mertens PPC, Baylis M. Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe. *Nature Rev Microbiol*. 2005;3:171-81.  
[9] McIntyre KM, Setzkorn C, Baylis M, Waret-Szkuta A, Caminade C, Morse AP, *et al.* Impact of climate change on human and animal health. *Vet Rec*. 2010;167(15):586.  
[10] Hubálek Z. North Atlantic weather oscillation and human infectious diseases in the Czech Republic, 1951-2003. *Eur J Epidemiol*. 2005;20:263-72.  
[11] Guis H, Caminade C, Calvete C, Morse AP, Tran A, Baylis M. Modelling the effects of past and future climate on the risk of bluetongue emergence in Europe. *J R Soc Interface*. 2012;9(67):339-50.

[12] Sara M, Morand S. Island incidence and mainland population density: mammals from Mediterranean islands. *Div Dist*. 2002;8:1-10.  
[13] Goüy de Bellocq J, Morand S, Feliu C. Patterns of parasite species richness of Western Palaearctic: micro-mammals: island effects. *Ecography*. 2002;25:173-83.  
[14] Poulin R, Morand S. The parasite biodiversity. Washington: Smithsonian Institution Press, 2004.  
[15] Martens P, Akin S-M, Huynen M, Mohsin R. Is globalization healthy: a statistical indicator analysis of the impacts of globalization on health. *Global Health*. 2010;6:16.  
[16] Rydén P, Sjöstedt A, Johansson A. Effects of climate change on tularaemia disease activity in Sweden. *Glob Health Action*. 2009;2. doi: 10.3402/gha.v2i0.2063.  
[17] Randolph SE. Tick-borne encephalitis virus, ticks and humans: short-term and long-term dynamics. *Curr Opin Infect Dis*. 2008;462:467.  
[18] Evengård B, Sauerborn R. Climate change influences infectious diseases both in the Arctic and the tropics: joining the dots. *Glob Health Action*. 2009;2. doi: 10.3402/gha.v2i0.2106.  
[19] Visbeck MH, Hurrell JW, Polvani L, Cullen HM. The North Atlantic Oscillation: Past, present, and future. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2001;98:12876-7.