

Assessment of yellow fever epidemic risk – a decision-making tool for preventive immunization campaigns

Re-emergence of yellow fever

Following several decades of relative calm, yellow fever (YF) reappeared in Africa in the 1980s, endangering populations not only in the so-called endemic countries but in the rest of the world also.

YF is a haemorrhagic viral fever transmitted by *Aedes* mosquitoes. The infection presents in various forms, ranging from fever to jaundice associated with diffuse haemorrhaging; there is a fatal outcome in 20 to 50% of severe cases.¹

There is no specific treatment for the disease. The development of a YF vaccine in the 1930s marked a decisive turning point because, even though it was not possible to cure the disease, it became possible to prevent transmission of the virus.²

The vaccine is safe and effective. A single injection offers protection for at least 10 years, or even for life.^{3,4} Between the 1940s and the 1960s, extensive vaccination campaigns were undertaken in several African countries that led to the virtual eradication of epidemics for more than 40 years. The more recent experience of the Gambia shows that immunizing

Évaluation du risque d'épidémies de fièvre jaune – Aide à la décision pour la réalisation de campagnes de vaccination préventive

Réémergence de la fièvre jaune

Après plusieurs décennies de calme relatif, la fièvre jaune est réapparue en Afrique dans les années 1980, mettant en danger non seulement les populations exposées dans les pays dit d'endémie mais aussi le reste du monde.

La fièvre jaune est une fièvre hémorragique virale transmise par les moustiques du genre *Aedes*. L'infection se présente sous des formes variées: de la simple fièvre à l'ictère associé à des hémorragies diffuses entraînant la mort dans 20 à 50% des cas graves.¹

Il n'existe pas de traitement spécifique de la maladie. Le développement d'un vaccin contre la fièvre jaune dans les années 1930 a marqué un tournant décisif dans l'histoire de cette maladie, donnant la possibilité de prévenir la transmission du virus à défaut de guérir la maladie.²

Le vaccin est sûr et efficace. Une seule injection protège pendant au moins 10 ans, voire toute la vie.^{3,4} Dans les années 1940-1960 de vastes campagnes de vaccination préventives ont été menées dans plusieurs pays d'Afrique, entraînant la quasi disparition des épidémies pendant près de 40 ans. L'expérience plus récente de la Gambie montre que la vaccination des populations contre la fièvre jaune est un

**WORLD HEALTH
ORGANIZATION
Geneva**

**ORGANISATION MONDIALE
DE LA SANTÉ
Genève**

Annual subscription / Abonnement annuel

Sw. fr. / Fr. s. 334.–

5.2007

ISSN 0049-8114

Printed in Switzerland

¹ Monath TP. Yellow fever: an update, 2000. In: *Lancet Infectious Diseases*, 2001, 1:11–20.

² Saluzzo J-F. *La guerre contre les virus [The war against viruses]*. Paris, Plon, 2002.

³ Poland JD et al. Persistence of a neutralizing antibody 30–35 years after immunization with 17D yellow fever vaccine. *Bulletin of the World Health Organization*, 1981, 59: 895–900.

⁴ Rosenzweig EC et al. Immunological studies with group B arthropod-borne viruses. IV. Persistence of yellow fever antibodies following vaccination with 17D strain yellow fever vaccine. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1963, 12:230–235.

¹ Monath TP. Yellow fever: an update, 2000. In: *Lancet Infectious Diseases*, 2001; 1:11–20.

² Saluzzo J-F. *La guerre contre les virus*. Paris, Plon, 2002.

³ Poland JD et al. Persistence of neutralizing antibody 30–35 years after immunization with 17D yellow fever vaccine. *Bulletin of the World Health Organization*, 1981, 59:895–900.

⁴ Rosenzweig EC et al. Immunological studies with group B arthropod-borne viruses. IV. Persistence of yellow fever antibodies following vaccination with 17D strain yellow fever vaccine. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1963, 12:230–235.

populations against YF is an impressive public-health tool. In 1978, a very severe YF epidemic in the Gambia affected an estimated 8400 people, including 1600 fatalities (case-fatality rate, 19%). Following this epidemic, the Gambia decided to immunize the entire population and incorporated YF vaccine into its routine infant immunization schedule. Since 1979, just one case of YF has been recorded, whereas significant outbreaks of the disease have occurred in the capital cities of Côte d'Ivoire, Guinea and Senegal.⁵

YF occurs in the tropics and subtropics of Africa and Latin America, where the natural host of the YF virus lives in forested areas. Given a favourable combination of factors, the virus escapes from its jungle (sylvatic) cycle and is transmitted to humans. Devastating epidemics occur in areas with dense populations of non-immunized subjects and large numbers of infected mosquito vectors, for example in towns.^{6,7}

The diminution of regular immunization campaigns, limited immunization coverage among successive cohorts of children and fewer vector control programmes have certainly contributed to the resurgence of YF since the late 1980s. Significant efforts have nevertheless been made in recent years to control the risk of epidemics. Of the 23 African countries considered to be at high risk, 19 (83%) have incorporated the YF vaccine into their routine immunization programmes (source: WHO, 2005).⁸

However, the resurgence of YF is also closely connected with changes in the modern world and the interaction of various economic, climatic, social and political factors.⁹ Certain factors impact more specifically on the epidemiological situation of YF in Africa, such as urbanization and migration.

Unchecked urbanization

With an annual growth rate of nearly 4%, Africa's cities are the fastest expanding in the world. Not only are more and more people living in the cities but the number of cities is also increasing. Whereas today 62.1% of Africa's population lives in rural areas, it is predicted that by 2020 this proportion will be reversed, i.e. that 63% of the continent's population will be urban dwellers. Between now and 2015, it is estimated that the number of cities with more than 1 million inhabitants will increase from 43 to 70 in Africa.¹⁰

On the edge of modern cities, shanty towns with no access to basic sanitation (running water and waste disposal) are also developing rapidly. The living environment of these

fantastique outil de santé publique. En effet, en 1978, la Gambie a été touchée par une terrible épidémie de fièvre jaune qui, selon les estimations, a affecté environ 8400 personnes, dont 1600 décès (taux de létalité, 19%). Suite à cette épidémie, le pays a décidé de vacciner toute la population et d'introduire le vaccin anti-amaril dans la vaccination de routine des enfants. Depuis 1979, seulement 1 cas de fièvre jaune a été notifié alors qu'au cours de la même période, d'importantes épidémies urbaines touchaient les capitales de la Côte d'Ivoire, de la Guinée et du Sénégal.⁵

La fièvre jaune est présente dans les zones tropicales et subtropicales d'Afrique et d'Amérique latine, où l'hôte naturel du virus amaril vit dans les régions forestières. A la faveur d'une conjonction de facteurs, le virus échappe à son cycle sylvatique et se transmet aux communautés humaines. Des épidémies dévastatrices, notamment dans les zones urbaines, se produisent lorsqu'il existe une forte densité de population humaine non protégée associée à une forte densité de moustiques vecteurs infectés.^{6,7}

La diminution des campagnes de vaccination régulières, la faible couverture vaccinale de cohortes successives d'enfants et la réduction des programmes de contrôle de vecteurs jouent certainement un rôle dans la résurgence de la maladie depuis la fin des années 1980. Des efforts importants ont pourtant été réalisés ces dernières années pour contrôler le risque épidémique. Sur les 23 pays considérés à haut risque en Afrique, 19 (83%) ont introduit le vaccin anti-amaril dans leur programme de routine (source: OMS, 2005).⁸

Cependant, la résurgence de la fièvre jaune est aussi très liée aux changements du monde moderne et à l'interaction de multiples facteurs économiques, climatiques, sociaux ou politiques.⁹ Certains facteurs influent plus particulièrement sur la situation épidémiologique de la fièvre jaune en Afrique, tels l'urbanisation et la migration.

Une urbanisation galopante

La croissance urbaine en Afrique est la plus rapide au monde, avec presque 4% par an. Non seulement de plus en plus de gens vivent dans les villes, mais les villes deviennent elles aussi plus nombreuses. Alors que 62,1% de la population africaine vit en zone rurale, les estimations prédisent que cette proportion s'inversera, avec 63 % de la population africaine devenue urbaine en 2020. D'ici à 2015, on estime que le nombre de villes de >1 million d'habitants passera de 43 à 70 en Afrique.¹⁰

En périphérie de ces villes modernes, les bidonvilles dans lesquels les populations n'ont pas accès aux services sanitaires de base (eau courante et évacuation des déchets) sont aussi en

⁵ Monath TP, Nasidi A. Should yellow fever vaccine be included in the expanded program of immunization in Africa? A cost-effectiveness analysis for Nigeria. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1993, 48(2): 274-299.

⁶ Monath TP. Facing up to re-emergence of urban yellow fever. *Lancet*, 1999, 353(9164):1558-1562.

⁷ See No. 29, 2005, pp. 250-256.

⁸ See No. 6, 2005, pp. 50-55.

⁹ Cardona O.D. The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism of effective risk assessment, 2003. In: Bankoff G. et al. *Mapping vulnerability: disasters, development and people*. London, Earthscan Publishers, 2003.

¹⁰ *World urbanization prospects: the 1999 revision*. New York, United Nations Population Division, 2001 (ST/ESA/SER.A/194).

⁵ Monath TP, Nasidi A. Should yellow fever vaccine be included in the expanded program of immunization in Africa? A cost-effectiveness analysis for Nigeria. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1993, 48(2):274-299.

⁶ Monath TP. Facing up to re-emergence of urban yellow fever. *Lancet*, 1999, 353(9164):1558-1562.

⁷ Voir N° 29, 2005, pp. 250-256.

⁸ Voir N° 6, 2005, pp. 50-55.

⁹ Cardona O.D. The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism of effective risk assessment, 2003. In: Bankoff G. et al. *Mapping vulnerability: disasters, development and people*. Londres, Earthscan Publishers, 2003.

¹⁰ *World urbanization prospects: the 1999 revision*. New York, Division de la Population de l'Organisation des Nations Unies, 2001. (ST/ESA/SER.A/194)

new urban populations promotes widespread contact between people and the *Aedes aegypti* mosquito, the vector for YF. Domestic water containers and all manner of refuse littering the streets (aluminium and tin cans, old tyres, etc.) favour the multiplication of breeding sites for mosquito larvae.¹¹

Migration

West Africa is witnessing significant migratory flows owing to rural exodus, movements of religious groups such as the Mourides in Senegal, cross-border movements of seasonal workers and nomadic pastoral communities, trade routes stretching from the Sahel to the coast of the Gulf of Guinea, the phenomenon of new urban dwellers returning regularly to their rural communities of origin, and migration by populations fleeing armed conflicts. These human movements increase the risk of contamination of non-immune persons travelling in areas where contaminated vectors persist and, conversely, favour the introduction of the disease into previously YF-free zones.¹²

Development of an immunity barrier: Yellow Fever Initiative

At a meeting of its Board in December 2005, the GAVI Alliance agreed to invest US\$ 62 million in YF epidemic risk reduction. This Initiative, launched jointly by WHO and UNICEF with the support of various partners,¹³ envisages the immunization of 48 million people in 12 high-risk countries between now and 2010.

Although this Initiative will not make it possible to immunize all the high-risk populations, it will counter the immediate threat by anticipating two disaster scenarios:

- the simultaneous outbreak of a number of urban epidemics that could exhaust international vaccine stockpiles;
- an uncontrollable epidemic such as that which occurred in Nigeria for several years in succession (from 1986 to 1991) affecting 19 of the 22 states in the country and giving rise to more than 16 000 cases (case-fatality rate, 22%).

The population of the 12 countries¹⁴ targeted by the Initiative is 283 million. During the initial phase, GAVI support will make possible the vaccination of approximately 17% of the population living in YF-endemic countries. The challenge is to prioritize immunization of the populations at highest risk and intensify surveillance of the epidemiological situation with a view to possible follow-up action.

To make the Initiative as effective as possible, the epidemic risk needs to be analysed to determine which groups should be accorded priority immunization.

¹¹ *Meeting the urban challenge*. Baltimore, Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health, 2002 (Population reports, Series M, No. 16).

¹² See No. 33, 2006, pp. 317-324.

¹³ As of November 2006, the following stakeholders were part of the Yellow Fever Partnership: WHO, UNICEF, the Centers for Disease Control and Prevention (CDC) in Atlanta (United States), the European Community Humanitarian Office (ECHO), the Agency for Preventive Medicine (AMP) and the Program for Appropriate Technology in Health (PATH).

¹⁴ Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Ghana, Guinée, Libéria, Mali, Nigéria, Sénégal, Sierra Leone and Togo.

pleine expansion. L'environnement de ces nouvelles populations urbaines favorise la promiscuité de l'homme avec les moustiques vecteurs de la fièvre jaune, les *Aedes aegypti*. Les récipients pour conserver l'eau de boisson, les déchets en tout genre qui jonchent les rues (cannettes en aluminium, boîtes de conserve, vieux pneus, etc.) favorisent la multiplication des gîtes larvaires.¹¹

Migrations

L'Afrique de l'ouest est caractérisée par des migrations intenses dues tant à l'exode rural qu'aux déplacements des congrégations religieuses comme les mourides du Sénégal, à des mouvements transfrontaliers de travailleurs saisonniers, aux communautés de pasteurs nomades, aux échanges commerciaux le long des routes allant du Sahel aux côtes du golfe de Guinée, aux nouvelles populations urbaines retournant régulièrement dans leur communauté rurale d'origine, ou enfin aux migrations des populations chassées par les conflits armés. Ces mouvements humains augmentent le risque de contamination des personnes non immunisées voyageant dans les zones où les vecteurs infectés persistent et inversement, l'introduction de la maladie dans les zones précédemment indemnes.¹²

Développement d'une barrière immunitaire: Initiative Fièvre Jaune

En décembre 2005, lors de la réunion de son conseil exécutif, l'Alliance GAVI a accepté d'investir 62 millions de dollars américains pour réduire le risque d'épidémies de fièvre jaune. Cette Initiative, menée par l'OMS et l'UNICEF avec le soutien de nombreux partenaires,¹³ prévoit d'immuniser 48 millions de personnes dans 12 pays à très haut risque de fièvre jaune, d'ici 2010.

Cette Initiative permettra non pas de vacciner l'ensemble des populations à haut risque mais de juguler la menace immédiate en prévenant 2 scénarios catastrophiques:

- la survenue simultanée de plusieurs épidémies urbaines, qui épuiserait la réserve mondiale de vaccins;
- la survenue d'une épidémie incontrôlable comme celle qui a touché le Nigéria durant plusieurs années consécutives (entre 1986 et 1991), affectant 19 des 22 états du pays et provoquant plus de 16 000 cas (taux de létalité, 22%).

La population des 12 pays¹⁴ retenus dans le cadre de cette Initiative s'élève à 283 millions. Dans un premier temps, le soutien du GAVI permettra de vacciner environ 17% des populations vivant dans ces pays d'endémie. Le pari est de vacciner en priorité les populations les plus à risque et de renforcer la surveillance pour suivre au plus près la situation épidémiologique de la maladie afin de décider de mesures complémentaires.

Pour rendre cette Initiative pleinement efficace, il s'agit de procéder à une analyse du risque épidémique pour définir quelles sont les populations à vacciner en priorité.

¹¹ *Meeting the urban challenge*. Baltimore, Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health, 2002 (Population reports, Series M, No. 16).

¹² Voir N° 33, 2006, pp. 317-324.

¹³ En novembre 2006, les partenaires suivants composaient le Partenariat Fièvre Jaune: l'OMS, l'UNICEF, les *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC) d'Atlanta (Etats-Unis), l'Office d'aide humanitaire de la Commission européenne (ECHO), l'Agence de Médecine Préventive (AMP) et le Programme de technologie appropriée pour la santé (PATH).

¹⁴ Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Ghana, Guinée, Libéria, Mali, Nigéria, Sénégal, Sierra Leone et Togo.

Risk assessment parameters

There are many contributory factors to an outbreak of YF. In order to identify those which are significant for risk analysis in view of recent epidemiological changes in the disease, WHO sought the views of a panel of experts who met in Dakar in September 2006.

The selection of the methodology and the indicators to be used were based on the criteria of rapidity, scientific basis – with value added for intuitive analysis – and simplicity of implementation, while allowing for the complexities of the situation.

Risk assessment is thus a decision-making tool enabling public health authorities to devise a quick risk-monitoring strategy based on reliable scientific data. Accordingly, the assessment is based on data for the most part already available. However, the possibility of carrying out additional studies, for example entomological research, is allowed for if warranted. The approach must be standardized in order to facilitate comparisons between countries at regional level. Furthermore, analysis at the subregional level is required in order to supplement analysis at the national level and take account of the significant migratory flows that characterize the geographical risk zone.

To help national health professionals familiarize themselves with the use of these tools, the assessment relies on easy-to-understand methods and techniques, while avoiding simplistic formulas that fail to take account of the complex nature of reality. The tools can also be used to monitor situations during the implementation phase of campaigns.

Theory and methodology of risk assessment

The model below¹⁵ defines the vulnerability¹⁶ of the population to vector-borne diseases and gives an insight into the current dynamics of the disease and the risk of epidemic.

$$\text{Vulnerability} = \text{exposure} \times \text{susceptibility} \times (1 - \text{resilience})$$

Vulnerability is a function of exposure to the YF virus, the susceptibility of the community to infection and the resilience of the population at risk.

In recent decades, exposure to the virus has increased owing to the various climatic, economic and social factors cited above.

The susceptibility of communities varies by geographical area. Since the re-emergence of YF in Africa in the 1980s and the occurrence of serious outbreaks such as the one in Nigeria, affected countries have embarked on preventive immunization campaigns or epidemic response campaigns, and have incorporated YF vaccine into the routine immunization schedule.¹⁷ It is thought

¹⁵ Sutherst R.W. Global change and human vulnerability to vector-borne diseases. In *Clinical Microbiology Review*, 2004, 136–173.

¹⁶ Vulnerability may be defined as the economic, social or political predisposition of a community to destabilization by an external, natural or man-made phenomenon.

¹⁷ Robertson SE et al. Yellow fever. A decade of re-emergence. *Journal of the American Medical Association*, 1996; 276(14):1157–1162.

Caractéristiques de l'évaluation du risque

Les facteurs concourant à l'occurrence d'une épidémie de fièvre jaune sont nombreux. Afin de définir les facteurs pertinents pour l'analyse du risque au vu des récentes évolutions épidémiologiques de la maladie, l'OMS a convoqué un panel d'experts qui s'est réuni à Dakar en septembre 2006.

Le choix de la méthodologie et des dimensions d'analyses utilisées s'est faite en fonction des critères suivants: rapide, scientifique – avec une valeur ajoutée par rapport à une analyse intuitive – simple à réaliser mais prenant en compte la complexité de la situation.

En effet, l'évaluation du risque est un outil d'aide à la décision pour que les autorités nationales de santé puissent élaborer rapidement une stratégie de contrôle du risque basée sur des données scientifiques de bonne qualité. L'évaluation repose donc essentiellement sur les données déjà disponibles. Cependant la réalisation d'études complémentaires est envisageable en cas de besoin, notamment en entomologie. L'approche doit être standardisée pour permettre les comparaisons entre pays au niveau régional. De plus, l'analyse au niveau de la sous-région est nécessaire pour compléter l'analyse au niveau national et prendre en compte des flux migratoires intenses qui caractérisent la zone géographique à risque.

Afin de faciliter l'appropriation des outils par les professionnels de santé du pays, l'évaluation repose sur des méthodes et des outils faciles à utiliser sans pour autant réduire l'approche à une équation simpliste ne rendant pas compte de la complexité de la réalité. Les outils développés peuvent aussi servir pour le monitoring de la situation au fur et à mesure de la mise en œuvre des campagnes.

Cadre théorique et méthodologie de l'évaluation du risque

Le schéma ci-dessous¹⁵ définit la vulnérabilité¹⁶ de la population aux maladies vectorielles et permet de rendre compte de la dynamique actuelle de la maladie et du risque d'épidémie.

$$\text{Vulnérabilité} = \text{exposition} \times \text{susceptibilité} \times (1 - \text{capacité d'adaptation})$$

La vulnérabilité met en balance l'exposition au virus amaril, la susceptibilité de la population à l'infection et la capacité d'adaptation des populations à risque.

Au cours des dernières décennies, l'exposition au virus a augmenté en raison des divers éléments climatiques, économiques et sociaux cités plus haut.

Quant à la susceptibilité des populations, celle-ci varie selon les zones géographiques. Depuis la résurgence de la maladie en Afrique dans les années 1980 et la survenue d'épidémies retentissantes comme celle du Nigéria, les pays affectés ont procédé à des campagnes de vaccination préventives ou pour la riposte aux épidémies, en plus de l'introduction du vaccin anti amaril dans le programme de vaccination de routine.¹⁷ On

¹⁵ Sutherst R.W. Global change and human vulnerability to vector-borne diseases, 2004. In: *Clinical Microbiology Review*, 2004, 136-173.

¹⁶ Vulnérabilité: la vulnérabilité peut être définie comme la prédisposition physique économique, sociale ou politique d'une communauté d'être déstabilisée par un phénomène externe, naturel ou provoqué par l'homme.

¹⁷ Robertson SE et al. Yellow fever. A decade of re-emergence. *Journal of the American Medical Association*, 1996; 276(14): 1157-1162.

that epidemic risk diminishes considerably once 60–80% of the population has been immunized.¹

Resilience is an important factor in this equation. If a country has very high resilience, its vulnerability is negligible. In the case of YF, resilience depends on the following factors: the ability to detect epidemics rapidly; the existence of a stockpile of vaccine for immediate response; and the ability to organize a mass immunization campaign as quickly as possible. The fewer multiple crises that a country has to confront simultaneously, the greater its resilience will be.

Risk analysis is a two-phase process:

- modelling of exposure and susceptibility indicators in rural and urban areas;
- interpretation of modelling outcomes by local stakeholders (i) adding known information on resilience and (ii) enhancing the analysis through the inclusion of factors that cannot be factored into the model, e.g. migration of nomadic populations or the existence of an international trade nexus.

The expert meeting in Dakar isolated 6 risk indicators relating to exposure and susceptibility.

Exposure-related indicators:

- Exposure to environmental risk:
 1. District situated in the ecological risk zone (15°N–10°S, wet savannah or dry forest).
- Exposure to YF virus and frequency of exposure:
 2. District reporting confirmed cases since 1960.
 3. District having confirmed suspected cases between 1960 and the establishment of surveillance based on laboratory-confirmed cases.
 4. Number of years in which YF cases notified since 1960 (by district).
 5. District close to another district that has notified cases since 1960.

Community susceptibility indicator:

6. Proportion of non-immunized population in the district. This information is obtained by subtracting the number of persons already immunized in the district during preventive or epidemic response campaigns and the number of children immunized under a routine programme (Expanded Programme on Immunization).

Mathematical modelling enables a range of interrelated risk variables to be handled simultaneously in order to give decision-makers a reliable albeit simplified snapshot of the level of vulnerability of communities. Mathematical modelling makes use of a wide range of techniques and approaches.¹⁸

This assessment aims to transpose a complex, multidimensional reality into a simple framework in order to facilitate decision-making. It maps out a domain and thereby enables decision-makers to make optimum choices in order to achieve the stated objective.

¹⁸ Beresniak A, Duru G. *Economie de la Santé [Economics of health]*. Paris, Masson, 1992.

considère que le risque épidémique diminue considérablement dès que 60 à 80% de la population est immunisée.¹

La capacité d'adaptation pèse fortement dans cette équation. Si un pays possède une très forte capacité d'adaptation, la vulnérabilité devient nulle. Pour la fièvre jaune, la capacité d'adaptation dépend des éléments suivants: la capacité à détecter rapidement une épidémie, l'existence d'un stock de vaccins disponible pour une riposte immédiate, et la capacité d'organiser une campagne de vaccination de masse dans les plus brefs délais. La capacité d'adaptation en sera d'autant meilleure que le pays n'a pas à faire face à de multiples crises en même temps.

L'analyse se fait en 2 étapes:

- une modélisation portant sur les dimensions d'exposition et de susceptibilité en milieu rural et en milieu urbain;
- l'interprétation des résultats de la modélisation par les acteurs locaux (i) en ajoutant les informations connues sur la capacité d'adaptation et (ii) en enrichissant l'analyse par des éléments ne pouvant être inclus dans le modèle comme les migrations des populations nomades ou l'existence d'un nœud d'échange commerciaux internationaux.

Suite à une réunion d'experts qui s'est tenue à Dakar, 6 dimensions du risque ont été retenues en rapport avec l'exposition et la susceptibilité.

Dimensions reflétant l'exposition:

- Exposition au risque environnemental:
 1. District situé dans la zone de risque écologique (15°N–10°S, savane humide ou sèche-forêt).
- Exposition au virus amaril et fréquence de l'exposition:
 2. District ayant notifié des cas confirmés depuis 1960.
 3. District ayant confirmé des cas suspects depuis 1960 jusqu'à la mise en place de la surveillance basée sur les cas avec confirmation de laboratoire.
 4. Nombre d'années où des cas de fièvre jaune ont été signalés depuis 1960 (par district).
 5. District proche d'un autre district ayant notifié des cas depuis 1960.

Dimension reflétant la susceptibilité des populations:

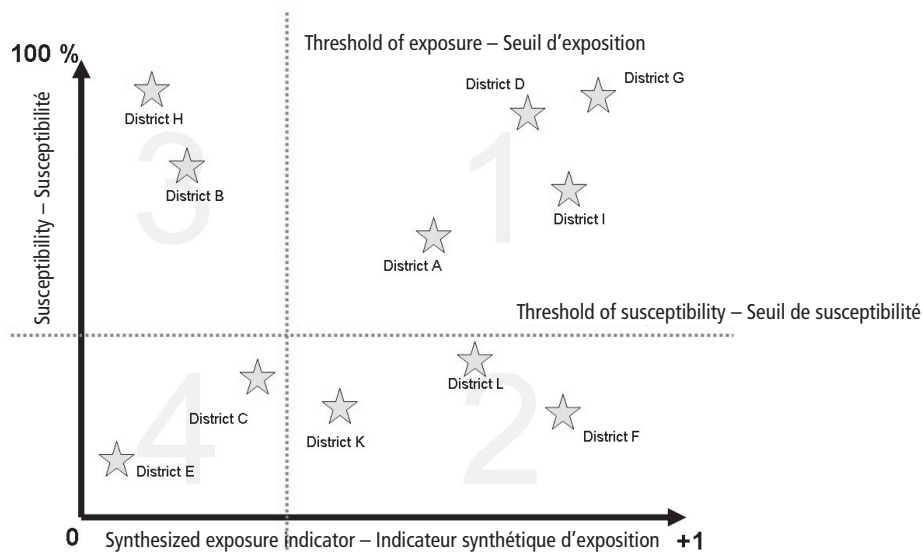
6. Proportion de la population non immunisée dans le district. Cette information est obtenue en déduisant les personnes déjà immunisées dans le district lors de campagnes préventives ou de riposte à une épidémie et les enfants vaccinés par le programme de routine (Programme élargi de vaccination).

La modélisation mathématique permet de traiter simultanément plusieurs facteurs de risque interagissant afin de pouvoir montrer aux décideurs une image fidèle mais simplifiée de la vulnérabilité des populations. La modélisation mathématique renvoie à un grand nombre de techniques et approches différentes.¹⁸

Dans le cadre de cette évaluation, l'objectif est de traduire une réalité complexe multidimensionnelle en une représentation simple pour faciliter le processus de décision. Il s'agit de faire la carte d'un territoire permettant aux décideurs de choisir le meilleur chemin à suivre pour atteindre l'objectif fixé.

¹⁸ Beresniak A, Duru G. *Économie de la santé*. Paris, Masson, 1992.

Fig. 1 **Vulnerability profile of districts on the graph determined by the axis of exposure and the axis of susceptibility**
 Fig. 1 **Profil de vulnérabilité des districts sur le plan défini par l'axe d'exposition et l'axe de susceptibilité**



Multiple correspondence analysis (MCA) has been selected as the technique to represent the exposure variables in synthesized form. MCA makes it possible to handle several indicators simultaneously and to work on qualitative data.¹⁹

Risk assessment is thus a two-phase procedure:

1. Using multiple correspondence analysis, transformation of the 5 exposure variables into a *synthesized exposure indicator* that plots the various points (districts) along an exposure axis. The indicator is thus a quantitative variable.
2. Correlation of the susceptibility variable with the synthesized exposure indicator to generate a graphical representation of vulnerability and clusters of districts with a similar profile.

Data are gathered at the most appropriate level, that of the health district.

The MCA outcomes enable districts to be mapped two-dimensionally (see Fig. 1) onto a plane bounded by axes representing susceptibility and exposure. The positioning of the districts on the graph enables the vulnerability profile to be charted as a function of the exposure and susceptibility thresholds.

- The districts in quadrant I are very vulnerable because their level of exposure is high and the population is highly susceptible. They should be vaccinated on a priority basis.
- The districts in quadrant II are very exposed but the population has already been immunized and is therefore less vulnerable.

L'analyse des correspondances multiples (ACM) a été choisie pour représenter de façon synthétique les facteurs d'exposition. L'ACM permet de prendre en compte plusieurs dimensions en même temps et d'opérer sur des données qualitatives.¹⁹

L'évaluation du risque repose alors sur une démarche en 2 étapes:

1. Avec une analyse de correspondance multiple, transformer les 5 facteurs d'exposition en un *indicateur synthétique d'exposition* qui reflète la projection des divers points (districts) sur un axe d'exposition. L'indicateur se comporte alors comme une variable quantitative.
2. Corréler la variable de susceptibilité avec l'indicateur synthétique d'exposition pour obtenir une représentation de la vulnérabilité et des groupes de districts présentant le même profil.

La collecte de données se fait au niveau du district sanitaire qui est l'unité la plus pertinente pour les données de santé.

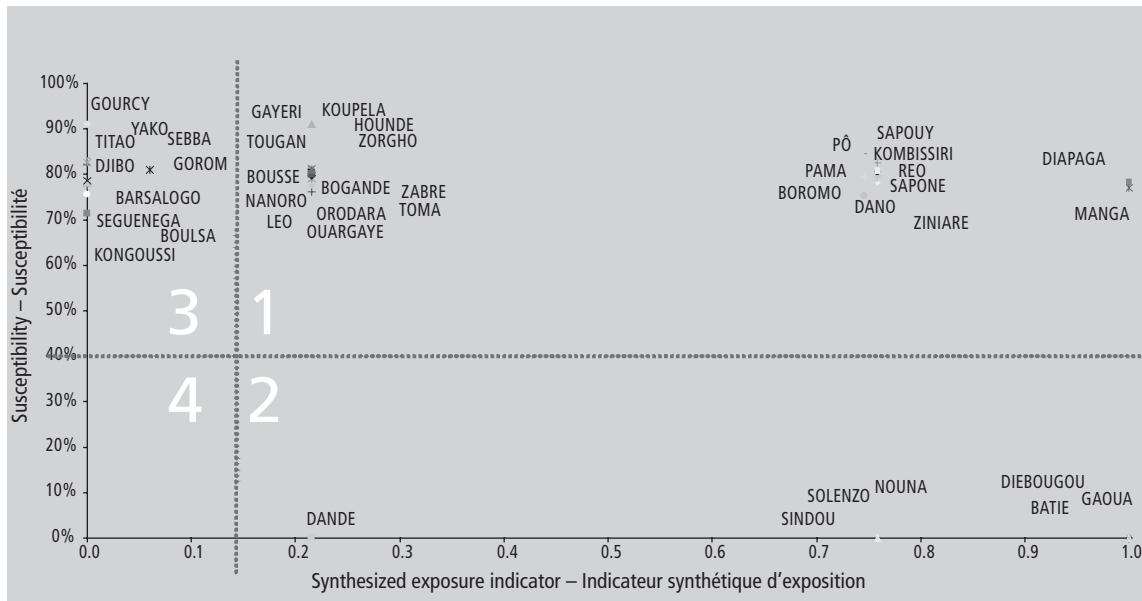
Les résultats de l'ACM permettent de situer les districts sur un plan à 2 dimensions (voir Figure 1) défini par des axes de susceptibilité et d'exposition. En fonction des seuils d'exposition et de susceptibilité, la position des districts sur le plan permet de préciser le profil de vulnérabilité.

- Les districts situés dans le cadran 1 sont très vulnérables car le degré d'exposition est élevé et les populations sont très susceptibles. Ceux-ci doivent être vaccinés en priorité.
- Les districts situés dans le cadran 2 sont très exposés mais les populations ont déjà été vaccinées et elles sont donc moins vulnérables.

¹⁹ Tenenhaus M., Young F. An analysis and synthesis of multiple correspondence analysis, optimal scaling, dual scaling, homogeneity analysis and other methods for quantifying categorical multivariate data. In *Psychometrika*: 91-119, 1985.

¹⁹ Tenenhaus M and Young F. An analysis and synthesis of multiple correspondence analysis, optimal scaling, dual scaling, homogeneity analysis and other methods for quantifying categorical multivariate data, 1985. *Psychometrika*: 91-119, 1985.

Fig. 2 **Vulnerability profile of rural districts in Burkina Faso on a plane bounded by exposure and susceptibility axes**
 Fig. 2 **Profil de vulnérabilité des districts ruraux du Burkina Faso dans le plan défini par les axes d'exposition et de susceptibilité**



- The districts in quadrant III are less exposed and the population are non-immunized. Vaccination in these districts is a lesser priority.
- The districts in quadrant IV are rarely exposed, the population has already been immunized and no future action is required in the coming years.

- Les districts situés dans le cadran 3 sont moins exposés, les populations sont non immunes. La vaccination peut y être menée dans un second temps.
- Les districts situés dans le cadran 4 sont peu exposés, les populations sont déjà immunisées et aucune intervention n'est nécessaire dans les années à venir.

Case study: Burkina Faso

The risk analysis applied to Burkina Faso profiles 4 clusters of rural districts in a plane bounded by axes representing exposure and susceptibility (see Fig. 2). The susceptibility threshold has been set at 40%, indicating that >60% of the population has been immunized and that the risk of an epidemic is low. At the interpretation briefing with local stakeholders, and after careful examination of the situation in each of the districts located in the upper part of the graph, the 2 clusters of districts on the right of the graph were judged to be very vulnerable. The district of Yako, although in quadrant III, was considered to be very vulnerable because of its market-gardening industry and the significant cross-border migration occasioned by this commercial activity.

The same analysis was performed separately in districts within urban agglomerations. This analysis of urban districts generated a synthesized exposure indicator specific to urban areas. A map of the vulnerability of rural and urban districts in Burkina Faso is shown in Map 1.

Vaccinations will shortly be carried out in 32 of 53 districts in order to create an immunity barrier that will reduce the risk of epidemics in future years.

Challenges and opportunities

The risk of epidemic depends on the interrelationship between complex factors. In this modelling exercise, it has been possible to take account of only a few of these

L'exemple du Burkina Faso

L'analyse du risque appliqué au Burkina Faso met en évidence 4 nuages de districts ruraux situés dans un plan défini par les axes d'exposition et de susceptibilité (voir Figure 2). Le seuil de susceptibilité a été fixé à 40%, indiquant que si >60% de la population est vaccinée le risque épidémique est moindre. Lors de la réunion d'interprétation des résultats avec les acteurs locaux et après une analyse attentive de la situation de chacun des districts situés dans la partie supérieure du graphique, les 2 nuages de districts situés le plus à droite ont été considérés comme très vulnérables. Le district de Yako, bien qu'étant situé dans le cadran 3, a été considéré comme très vulnérable en raison des activités maraîchères qui s'y déroulent et des migrations transfrontalières importantes qui ont lieu en raison de cette activité commerciale.

La même analyse a été réalisée séparément dans les districts situés dans les agglomérations urbaines. Cette analyse sur les districts urbains a produit un indicateur synthétique d'exposition spécifique des zones urbaines. La cartographie de la vulnérabilité pour le Burkina Faso pour les districts ruraux et urbains est présentée dans la Carte 1.

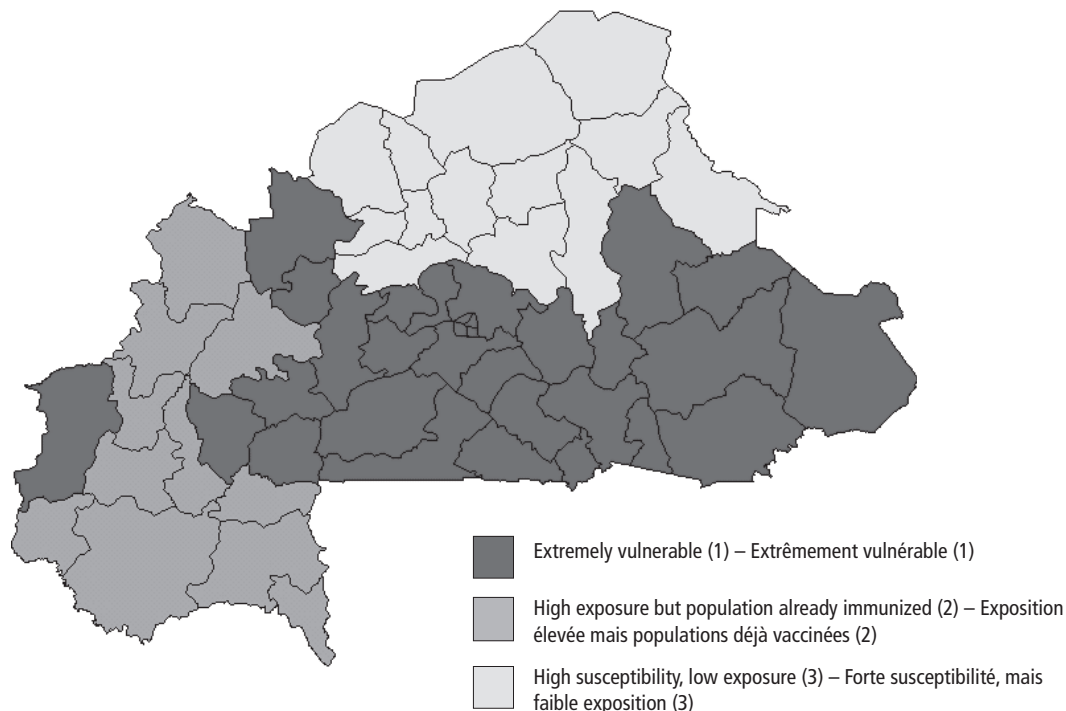
Au total, 32 districts sur 53 seront prochainement vaccinés afin de mettre en place une barrière immunitaire capable de réduire le risque épidémique dans les années à venir.

Défis et opportunités

Le risque épidémique dépend de l'interaction de facteurs complexes. Seuls quelques uns de ces facteurs ont pu être pris en compte dans la modélisation. En effet, pour que le modèle

Map 1 **Distribution of districts by vulnerability to risk of YF epidemics, Burkina Faso, 2007**

Carte 1 **Répartition des districts en fonction du profil de vulnérabilité au risque d'épidémies de fièvre jaune, Burkina Faso, 2007**



factors. For the model to function correctly, it is vital that no data are missing for the selected variables. One part of the risk assessment is thus based on a standardized analysis of certain factors, while other parameters are supplied at an interpretation briefing that draws on a range of information sources, such as epidemic investigation reports, routine surveillance data or interviews with key personnel in the risk management system.

The complementary approach to modelling, which is more qualitative, means that it is possible to take account of significant risk factors that cannot be handled by the model, for example migratory flows, resilience and better assimilation of the results by local stakeholders. However, factors specific to each country, which are sometimes based on a more subjective assessment of the situation, are difficult to incorporate into a regional analysis. ■

puisse fonctionner, il est important qu'il n'y ait pas de données manquantes pour les variables sélectionnées. Une partie de l'évaluation repose donc sur une analyse standardisée de quelques facteurs, les autres éléments d'analyse étant générés lors de la réunion d'interprétation en utilisant différentes sources d'information comme des rapports d'investigation d'épidémie, des données de surveillance de routine, ou des interviews de personnes clés dans le système de gestion de risque.

L'approche complémentaire à la modélisation, plus qualitative, permet d'une part de prendre en compte des facteurs de risque importants mais non modélisables, comme les flux migratoires ou la capacité d'adaptation, et d'autre part, une meilleure appropriation des résultats par les acteurs locaux. En revanche, ces éléments, spécifiques à chaque pays et reposant parfois sur une analyse plus subjective de la situation, seront difficiles à prendre en compte pour une analyse au niveau régional. ■