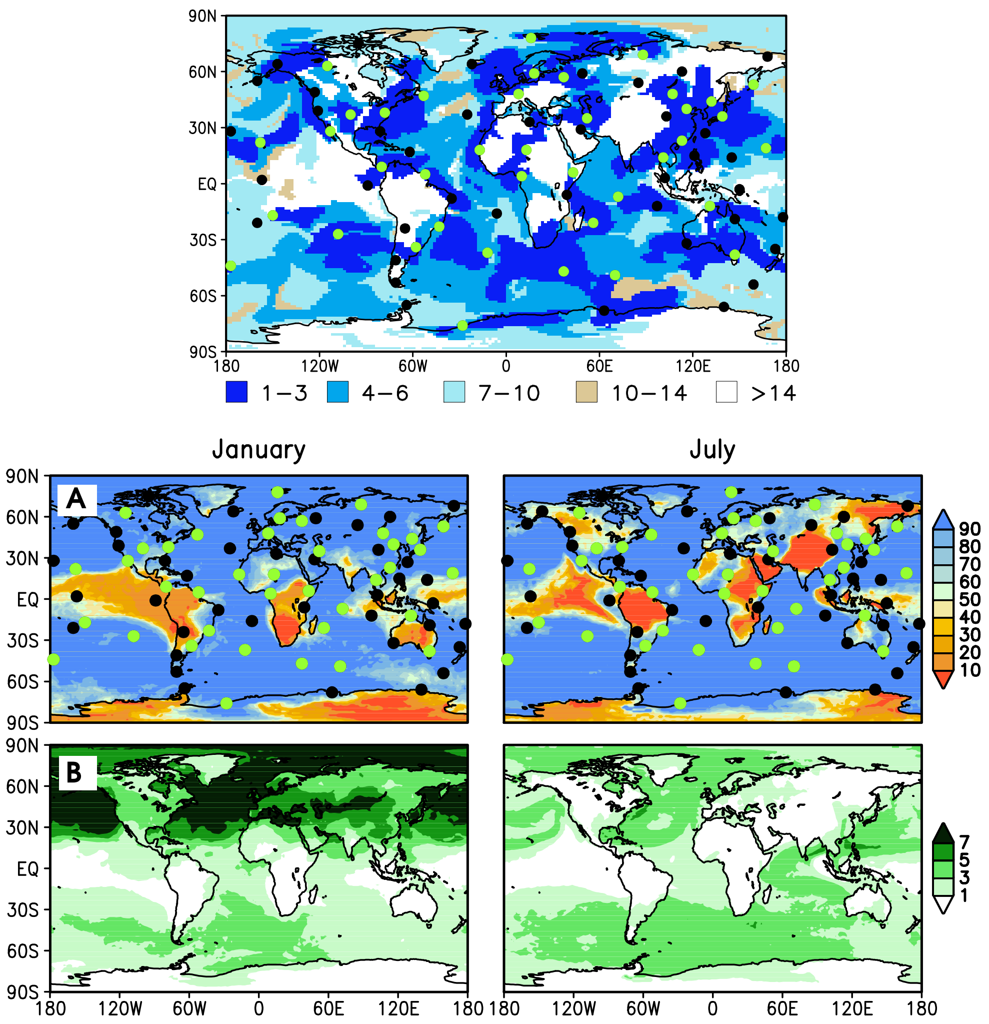

FIG. 4.9 – Calculs de la capacité de détection du réseau Xenon du TICE. On montre en haut le délai de détection (en jour) pour un essai sub-surface de 1 kt et une date de détection particulière (ici le 15 janvier 1991). La couleur bleue foncée montre par exemple la zone qui a été détectée pour un tir effectué entre 1 et 3 jours auparavant. La réunion des régions colorées montre la partie de la surface du globe dans laquelle un tir dans la première quinzaine de janvier aura été détecté au moins une fois le 15 janvier. On montre en dessous les cartes de probabilité de détection (**A**, $\%$) d'essais sub-surface par le réseau gaz nobles (en pratique à partir de la détection du ^{133}Xe) pour les mois de juillet et janvier. Les points correspondent aux emplacements des 80 stations du réseau TICE et, parmi eux, les points verts correspondent aux stations gaz nobles. Les cartes du bas (**B**) correspondent au nombre moyen de stations détectant un essai.

Les réseaux développés pour la vérification du TICE ont été dimensionnés a priori pour pouvoir détecter des essais d'une kt équivalent TNT partout sur la planète. Comme on l'a déjà dit dans l'introduction de ce chapitre, la détection et la localisation des évènements suspects reposera sur la mesure d'ondes se propageant depuis le lieu de l'explosion : mesures sismiques pour des tirs souterrains, mesure d'ondes infra-sonores pour les essais atmosphériques et hydroacoustiques pour les essais sous-marins. Le quatrième réseau – celui qui nous intéresse ici – mesurera en 80 stations la radioactivité atmosphérique associée aux aérosols. 40 de ces 80 stations seront en plus équipées d'instrument mesurant la concentration en isotopes du xénon. Alors que les isotopes radioactifs se fixant sur des aérosols ne sont relâchés que dans le cas d'essais atmosphériques, le xénon, gaz noble non soluble dans l'eau, est a priori émis également en quantité appréciable lors d'essais sous-marins ou souterrains (De Geer, 1996).

Avec une demi-vie de 5,2 jours, le ^{133}Xe est l'isotope le plus important du xénon loin des sources. Le comité d'experts en charge de la définition des réseaux TICE a estimé qu'un essai nucléaire de 1 kt doit relâcher environ 10^{15} Bq si il est aérien ou sous-marin et environ 10 fois moins pour un essai souterrain (le xénon s'échappant alors par des failles, Carrigan et al., 1996). A partir de ces chiffres, un seuil de détection de 1 mBq m^{-3} a été retenu comme spécification pour les mesure de xénon. Pour parvenir à cette sensibilité, les détecteurs prélèvent de l'air sur une journée entière avec des pompes puissantes pour effectuer une mesure.

Nous sommes arrivés dans la boucle des discussions avant que le choix des 40 stations du sous-réseau ne soit définitivement arrêté. Grâce à l'approche inverse présentée ci-dessus, et à sa mise en œuvre dans LMDZ, nous avons pu alors produire des cartes globales d'efficacité de détection du réseau pour les différents choix de sous réseaux (note interne CEA).

Nous présentons ci-dessous les résultats du calcul d'efficacité du réseau xénon pour la détection des essais souterrain où sous-marin et pour la configuration finalement retenue pour le réseau xénon.

Dans ce cas particulier, la symétrie du calcul est totale. Au lieu d'effectuer les tirs aux stations et de les détecter au niveau des détecteurs, on injecte dans le modèle les $Q = 10^{15}$ Bq à l'ensemble des 40 détecteurs (un traceur par détecteur) à un instant donné. Si on s'intéresse à une détection ayant lieu le 14 juillet par exemple, on injecte le traceur au détecteur uniformément pendant la journée. On intègre le modèle à l'envers en tenant compte d'une décroissance radioactive avec une demi-vie de 5,2 jours. Un essai effectué par exemple le 5 juillet sera détecté par cette station le 15 si le rétro-panache émis le 15 à la station dépasse le 5 le seuil de détection des appareils à l'endroit où le tir est effectué. pour tenir compte de la moindre source pour les essais souterrains, le seuil est de 1 mBq m^{-3} sur mer et seulement 0, 1 mBq m^{-3} sur continents.

Les simulations ont été effectuées avec le modèle LMDZ débranché en relisant les archives d'une simulation guidée en résolution 96x72x19 et en redécoupant chaque maille horizontale en 2x2 mailles pour obtenir une résolution de 1,9^o $\times$ $1,25^o$ pour le calcul du transport.

Les résultats sont montrés sur la Fig. 4.9. On montre d'abord sur la figure du haut les "zones de visibilité" du réseau avec des délais de plus en plus grands pour une détection le 15 janvier 1991. Les stations du sous-réseau xénon sont localisée par des points verts. On reconnaît bien dans les tropiques sur les océans les régimes d'alizés avec une zone de visibilité confinée dans une bande relativement étroite à l'est des stations. L'étendue des zones détectées est beaucoup plus grande dans les moyennes latitudes. On voit qu'au bout de 14 jours, le réseau est loin de détecter l'ensemble de la surface du globe dans les tropiques. Le gain de détection est relativement faible entre les jours 10 et 14. De plus, dans les tropiques, les zones détectées sont alors souvent déconnectées des zones détectées plus tôt, ce qui indique qu'on détecte de l'air qui a recirculé dans la troposphère moyenne ou haute. C'est particulièrement clair dans le Pacifique tropical ou les détections au-delà de 10 jours proviennent de régions proches de l'équateur et correspondent donc à des traceurs ayant été emportés dans les cellules

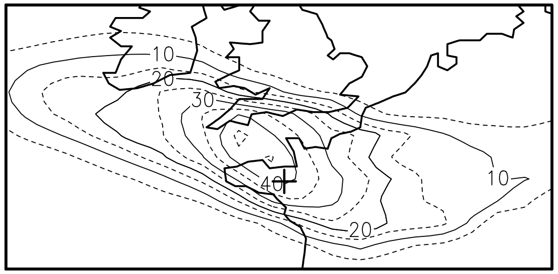

FIG. 4.10 – Carte montrant, au point de la source potentielle, le FMT moyen entre simulation et observation pour 9 stations ETEX. Les concentrations simulées sont calculées à partir des rétro-panaches émis depuis les 9 stations. La croix correspond à la localisation effective de la source.

de Hadley avant de redescendre pour être détecté plus haut en latitude.

On effectue ensuite des statistiques à partir d'un ensemble de simulations pour des jours de détection différents. En pratique ici, on a effectué les statistiques à partir de 15 jours de détection, allant du 15 au 31 janvier dans un cas et du 15 au 31 juillet dans l'autre pour estimer les effets saisonniers. On voit clairement sur les graphiques **A** de la Fig. 4.9 que le réseau est insuffisant dans les tropiques, à la fois à cause de la relative étroitesse des zones détectées dans les régions d'alizés et parce qu'une bonne partie des traceurs est emportée dans la haute atmosphère par la circulation de Hadley. La détection est évidemment globalement plus faible pour les tirs souterrains. Les graphiques du bas montrent la redondance des mesures, c'est à dire le nombre de fois moyen où un essai va être détecté. On voit que le réseau ne montre une relative redondance que dans les moyennes latitudes, sur les océans.

D'autres calculs ont été effectuées, notamment des calculs pour le réseau aérosols qui montrent que ce réseau aura une très bonne capacité de détection, au problème près du lessivage, processus encore très mal connu et ne pouvant être représenté que de façon assez grossière dans les modèles (note interne CEA).

4.6.2 Inversion des paramètres de la source

En cas de redondance des mesures, la question qui vient rapidement à l'esprit est de savoir si il est possible de localiser les sources. De nombreuses approches existent pour combiner les rétro-panaches afin d'essayer de localiser les sources. Plus précisément dans le cadre du TICE, il s'agirait de déterminer la position, la date et l'intensité de la source.

La question est plus importante qu'il n'y paraît à première vue dans le cas du TICE. On a vu en effet que dans ce cas, la localisation devrait être effectuée par les réseaux sismiques, infra-sonores ou hydroacoustiques. Mais la question qui va se poser nécessairement, c'est l'interprétation de tous les évènements douteux, qui n'auront justement pas été enregistrés par les autres réseaux et pourront correspondre souvent à des incidents ou accidents nucléaires. En fait, la sensibilité du réseau xénon est telle que le nucléaire civile va être assez systématiquement enregistré aux stations xénon, même en période de fonctionnement normal.

Nous avons laissé cette question et l'étude des méthodes associées à nos collègues du CEA. Nous montrons cependant pour illustration un calcul de localisation de la source d'ETEX à partir de rétro-panaches. On suppose ici que la date et l'intensité de la source sont connues. On utilise les simulations

à 9 des 11 stations ETEX étudiées précédemment (NL05, B05, NL01, D44, DK05, DK02, D05, PL04 et H02).

Pour n'importe quelle position possible de la source, on peut calculer la moyenne des FMT ($\sum_i FMT_i/9$) par rapport aux observations réelles. Une fois les rétro-panaches calculés, ce calcul est très peu coûteux numériquement. Le résultat est montré sur la Fig. 4.10. L'estimation grossière qui consisterait à prendre comme lieu d'émission le maximum de cette fonction objective donnerait une source située dans la manche, éloignée d'environ 100 à 300 km du lieu réel d'émission.

Les mêmes cartes peuvent bien sûr être calculées pour n'importe quelle intensité de la source et n'importe quel instant d'émission. Le maximum de la fonction objective peut dans ce cas encore être estimé par une simple recherche du minimum absolu. Plus généralement, l'approche peut être appliquée à la détermination d'une source étendue à la fois dans le temps et dans l'espace. L'accroissement de la dimension du système peut alors nécessiter l'utilisation d'algorithmes de minimisation plus sophistiqués adaptés à des fonctions montrant des extrema locaux.

4.6.3 Inversion de sources continues

L'approche du rétro-transport peut également être utilisée pour inverser des sources continues. Des travaux ont été entrepris dans ce sens au LSCE (Peylin et al., 2004) dans le cadre du contrôle des émissions de CO_2. Depuis un certain nombre d'années, des méthodes inverses sont utilisées pour essayer de contraindre les puits et sources de CO_2 à partir de mesures de concentration à des stations de surface (Bousquet et Peylin, 2000). La méthode utilisée jusque là consistait à effectuer des simulations directes de transport avec des sources affectées à des grandes régions (quelques dizaines au plus pour couvrir le globe). Les concentrations ainsi simulées étaient ensuite utilisées pour contraindre les puits et sources sur une base mensuelle.

Le travail entrepris avec l'approche rétro-transport vise à régionaliser cette description des puits et sources en utilisant la partie haute fréquence (synoptique dans un premier temps) des observations de CO_2. Dans le cas d'une source continue en surface, le rétro-transport fournit un modèle paramétrique de la mesure

$$J_n = \int_\Omega \rho c_i {c^*}_n d\vec{x}_{|t=0} + \int_{S\times\tau} \Sigma {c^*}_n dxdydt \qquad (4.120)$$

qui dépend des flux en surface Σ et de la concentration initiale c_i. Si on remonte le rétro-panache sur une période suffisamment longue (un mois par exemple), ce rétro-panache devient très diffus. La mesure n'est alors plus sensible aux conditions initiales qu'au travers de la valeur moyenne du CO_2 dans une vaste zone. Cette concentration moyenne est a priori relativement facile à contraindre, soit par de la modélisation directe, soit dans l'algorithme d'inversion. Cette dépendance aux conditions initiales ne devrait donc pas trop perturber la capacité à reconstruire localement les sources à partir des mesures de concentration. Peylin et al. (2004) on proposé une solution pratique à ce problème du traitement des conditions initiales et montrent que l'inversion des variations synoptiques des concentrations de CO_2 permet effectivement de commencer à régionaliser les sources.

4.6.4 Quelques remarques d'ordre général pour les applications

1. Ce qu'il faut stoker comme rétro-concentrations, ce sont des concentrations moyennes entre deux instants de stockages. Sous ces conditions, on retrouve une inversion exacte pour une source ne fluctuant pas dans le temps.