

# Émissions de gaz à effet de serre dues à l'agriculture et aux usages des sols en France : une analyse spatiale

Raja Chakir, Stéphane De Cara et Bruno Vermont \*

---

Nous examinons la distribution spatiale des émissions de gaz à effet de serre dues à l'agriculture et aux usages des sols entre 1993 et 2003 à l'échelle des départements français. Dans un premier temps, nous appliquons la méthode retenue dans les inventaires nationaux pour calculer les émissions départementales dues à l'utilisation d'engrais synthétiques, à la fermentation entérique, aux effluents d'élevage ainsi que les émissions nettes liées aux usages des sols (utilisations des terres, forêt, changements d'usages des sols). Nous analysons ensuite la répartition départementale des émissions nettes par catégorie cumulées sur la période 1993-2003. Nous montrons que les régions dont les émissions agricoles sont élevées sont fortement regroupées au nord et au nord-ouest de la France alors que les régions situées au sud-est et à l'est sont caractérisées par un puits net (émissions négatives) lié aux usages des sols important. Il apparaît ainsi une séparation claire entre les régions dont le bilan net total en émissions est négatif à l'est, les régions dont les émissions nettes sont importantes au nord-ouest et les régions avec un bilan net intermédiaire le long d'une diagonale nord-est/sud-ouest. Ces éléments descriptifs sont confirmés par une analyse exploratoire spatiale. Nous montrons qu'il existe une autocorrélation spatiale globale positive pour chacune des catégories d'émissions ainsi que pour les émissions nettes totales et ce sur l'ensemble de la période. L'analyse de l'autocorrélation spatiale locale entre les émissions départementales nous permet d'identifier les groupements spatiaux significatifs ainsi que les localisations atypiques. L'analyse souligne ainsi l'importance de la dimension spatiale, notamment dans la définition des politiques publiques.

---

\* INRA, UMR Économie Publique Inra-AgroParistech, BP01, F-78850 Thiverval-Grignon, France.

Mél. de Raja Chakir : raja.chakir@grignon.inra.fr.

Cette étude a bénéficié du soutien financier du projet Agriculture Développement Durable-IMPACT de l'Agence Nationale de la Recherche. Nous remercions le Service de la Statistique et de la Prospective du Ministère de l'Agriculture pour avoir mis à notre disposition les données de l'enquête TERUTI dans le cadre de ce projet.

**D**u fait des émissions de méthane ( $\text{CH}_4$ , principalement dues à l'élevage) et de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ , dues à la fois aux effluents d'élevage et aux apports azotés aux cultures), l'agriculture contribue à hauteur d'environ 18 % aux émissions totales françaises de gaz à effet de serre (GES), soit 96 MtCO<sub>2</sub>eq (millions de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent) pour l'année 2007 (CITEPA, 2009). Par ailleurs, les usages des sols (et leurs changements) influent sur le cycle du carbone dans les sols et la biomasse aérienne, soit en favorisant le stockage de carbone (puits), soit, au contraire, en libérant du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (sources). Cet ensemble - regroupé sous le terme « Utilisation des Terres, leurs Changements, et la Forêt » (UTCF) - constitue un puits net d'environ 73 MtCO<sub>2</sub>eq au niveau national en 2007 (CITEPA, 2009).

Malgré le caractère global de l'effet de serre, la répartition spatiale des émissions nettes dues à l'agriculture et à l'UTCF revêt une importance particulière. Tout d'abord, les émissions d'origine agricole et celles liées à l'UTCF ne sont pas *a priori* indépendantes (De Cara et Thomas, 2008) du fait de la concurrence entre les différents usages des sols : les modifications de l'activité agricole ont un impact sur les usages des sols (par exemple sur le partage prairies/cultures ou la conversion de terres agricoles vers d'autres usages) qui n'est pas neutre du point de vue des puits de carbone ; symétriquement, les changements d'usage des sols affectent la production et donc les émissions agricoles. L'appréciation de la résultante nette de ces interactions sur le bilan en GES n'est pas aisée car elle nécessite une approche spatialement explicite qui tienne compte d'arbitrages complexes à un niveau géographique fin entre des usages aux effets contrastés dans l'espace sur les sources et les puits. De fait, ces interactions sont ignorées dans la plupart des analyses qui se sont jusqu'ici penchées sur les instruments économiques de régulation soit des émissions agricoles, soit de la séquestration du carbone. Elles sont pourtant au cœur du débat sur la place de l'agriculture dans l'effet de serre, que ce soit à travers la question de l'élevage (*via* son rôle à la fois sur les émissions et sur le maintien des stocks de carbone dans les prairies, Steinfeld *et al.*, 2006 ; Simm, 2010) ou des effets indirects des politiques de développement des biocarburants (notamment sur la déforestation, Searchinger *et al.*, 2008).

La répartition dans l'espace des sources et des puits de GES dus à l'agriculture et à l'UTCF est également importante pour la définition des

instruments de politique publique. Si, à une échelle géographique donnée, les liens entre émissions agricoles et puits sont forts, une politique efficace devra vraisemblablement couvrir l'ensemble des sources et des puits afin de limiter les effets de « fuites ». Si, au contraire, émissions agricoles et puits liés à l'UTCF ont lieu dans des zones géographiques distinctes, il est possible que des politiques spécifiques à chaque source/puits, mais bien ciblées géographiquement, soient suffisantes. De plus, la mise en place de tels instruments de régulation est susceptible d'avoir des effets différenciés dans l'espace, pénalisant les zones émettrices nettes et bénéficiant au contraire aux zones où les puits dominent les sources. En modifiant la profitabilité relative des différents usages des sols, de tels instruments peuvent ainsi avoir des conséquences sur la valeur marginale de la terre et le marché foncier.

Nous dressons dans ce texte un bilan détaillé des émissions de GES d'origine agricole dues à l'utilisation d'engrais synthétiques, à la fermentation entérique et aux effluents d'élevage, ainsi que des sources/puits de carbone dus à l'UTCF à l'échelle des départements de la France métropolitaine. La méthode de calcul retenue, similaire à celle utilisée dans les inventaires nationaux, est appliquée aux données départementales concernant les effectifs animaux, l'utilisation d'azote et les usages des sols. Ces données nous permettent de déterminer les émissions nettes (sources - puits) à une échelle relativement fine, ainsi que leur évolution sur l'ensemble de la période considérée (1993-2003). Nous menons ensuite une analyse statistique exploratoire spatiale qui met en évidence la structure spatiale de ces différentes sources d'émissions agricoles de GES et celles liées à l'UTCF.

L'apport de cet article est de trois ordres. Tout d'abord, il prend en compte simultanément l'ensemble des sources d'émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O d'origine agricole ainsi que les sources/puits de CO<sub>2</sub> liés à l'usage des sols. Cette couverture large nous permet d'établir un bilan en émissions nettes qui inclut notamment les secteurs de l'agriculture et de la forêt (et les transferts entre ces deux usages). La plupart des travaux existants se sont jusqu'ici concentrés soit sur les émissions du seul secteur agricole (De Cara et Jayet, 2011 ; Pérez Domínguez *et al.*, 2009, par exemple), soit sur la séquestration du carbone (Plantinga *et al.*, 1999 ; Richards et Stokes, 2004 ; van Kooten et Sohngen, 2007). Les contributions qui analysent ces deux secteurs simultanément travaillent généralement

à une échelle relativement agrégée (McCarl et Schneider, 2001 ; Schneider *et al.*, 2007). Ensuite, les cartes d'émissions établies au niveau départemental nous permettent de mettre en lumière la structure spatiale des émissions nettes et d'analyser son évolution dans le temps. Enfin, nous caractérisons de manière systématique la répartition spatiale des émissions à l'aide des outils statistiques de l'analyse spatiale exploratoire (Haining, 1990 ; Anselin, 1998 a, b).

### Désagrégation des émissions, puits et sources de GES à l'échelle départementale

#### *Calcul des émissions d'origine agricole*

Nous distinguons trois catégories d'émissions : (i) les émissions de  $N_2O$  liées aux apports d'engrais synthétiques (notées EMN dans la suite du texte), (ii) les émissions de  $CH_4$  dues à la fermentation entérique (EMFE) et (iii) les émissions de  $CH_4$  et de  $N_2O$  liées au stockage, à la gestion et à l'épandage des effluents d'élevage (EMEF) (1).

Il est à noter que cette nomenclature ne correspond pas exactement à celle retenue dans les inventaires d'émissions effectués par le CITEPA (2009). Dans ces derniers, les émissions dues aux sols agricoles (catégorie 4.d des inventaires) regroupent les émissions dues à l'ensemble des apports d'azote qu'ils proviennent d'engrais synthétiques ou des effluents d'élevage. Notre nomenclature sépare explicitement ces deux sources d'azote. Ainsi, les émissions dues à l'utilisation d'engrais synthétiques sont clairement associées aux cultures alors que les émissions liées aux effluents d'élevage ont trait à la fois à l'élevage et aux cultures. Les émissions liées à la fermentation entérique peuvent être, quant à elles, associées sans ambiguïté à l'élevage. D'une manière générale, nous appliquons ici les mêmes modes de calculs que ceux retenus dans les inventaires français d'émissions. L'échelle retenue dans nos calculs est départementale, l'échelle la plus fine compte tenu de la disponibilité des données.

Les émissions dues aux apports d'engrais azotés synthétiques (EMN) correspondent à la transformation d'une fraction de l'azote apporté en  $N_2O$  soit directement après l'apport, soit indirectement après le transport et la redéposition de l'azote volatilisé ou lessivé. La méthode retenue par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour calculer ces émissions demeure relativement

simple. Les données de livraisons d'engrais au niveau départemental fournies par l'Union des industries de la fertilisation (UNIFA) renseignent sur les quantités d'azote contenues dans les engrais livrés de la campagne 1989/90 à la campagne 2008/09 dans chaque département de France métropolitaine (UNIFA, 2009) (2). Ces quantités d'azote sont multipliées par les facteurs d'émission utilisés dans les inventaires établis par le CITEPA (2009) en tenant compte des parts d'azote volatilisé et lessivé, tirées également des inventaires d'émissions. Les facteurs d'émissions et les parts d'azote lessivé et volatilisé sont supposés constants dans le temps et dans l'espace.

Deux difficultés entourent la comptabilisation des émissions de  $N_2O$ . Tout d'abord, il convient de rappeler que le facteur d'émission retenu est caractérisé par une incertitude importante du fait de la complexité et de la grande variabilité spatiale et temporelle des processus biologiques à la source des émissions de  $N_2O$  par les sols agricoles (3) (Winiwarter et Rypdal, 2001). Les émissions calculées conformément aux méthodes retenues par les instances internationales correspondent ainsi à des valeurs moyennes. De plus, les données de livraisons au niveau départemental ne permettent pas toujours de rendre compte du lieu où sont utilisés effectivement les engrais. C'est le cas notamment lorsque les livraisons se font vers des structures (ports, organismes de distribution, ateliers d'engrais composés) qui redistribuent ensuite les engrais vers d'autres départements (UNIFA, 2009). Cette difficulté est donc susceptible de perturber quelque peu la distribution spatiale des émissions calculées (4). Malgré cette fragilité,

1. Nous négligeons dans ce texte les émissions de méthane dues à la riziculture qui sont très marginales en France.

2. Les deux départements corses sont regroupés en un seul, ainsi que trois départements d'Île de France (78, 91, 95). Paris (75) et les départements de la petite couronne (92, 93, 94) sont exclus.

3. Cette remarque vaut également pour les facteurs de séquestration du carbone dans les sols, et - quoique dans une moindre mesure - pour les autres sources d'émissions agricoles.

4. Une analyse économétrique relativement simple (panel avec effet fixe liant les livraisons départementales et les surfaces en différentes cultures) permet de mettre en évidence les départements « excédentaires » (effet fixe significatif et positif) et les départements « déficitaires ». Dans la première catégorie, on identifie ainsi les départements disposant de ports pour l'importation d'engrais (13, 35, 64, 44, 76), ainsi que des départements susceptibles d'abriter des structures importantes de commercialisation ou de mélange (exemple : 28, 40). Il nous est en revanche impossible - à moins de recourir à des hypothèses très fortes - de déterminer la part de l'excédent effectivement exportée et la répartition des excédents sur les départements déficitaires. L'utilisation de sources de données complémentaires (RICA, enquête pratiques culturales, par exemple) se heurte à des incompatibilités dans le périmètre et l'échelle spatiale ou temporelle. Les intégrer nécessiterait un modèle économétrique qui dépasse le cadre de cette étude.

l'absence de données de consommation à une échelle départementale sur l'ensemble de la période considérée nous contraint à conserver l'approche « livraisons ». Il est à noter par ailleurs que cette approche est celle utilisée dans les inventaires du CITEPA (2009), et donc permet de conserver une cohérence avec les données d'émissions nationales.

Les émissions de CH<sub>4</sub> causées par la fermentation entérique (EMFE) sont principalement le fait des bovins. Elles sont déterminées à partir des effectifs départementaux des animaux donnés par la statistique agricole annuelle (AGRESTE, 2008) et des facteurs d'émissions spécifiques à chaque catégorie animale (bovins laitiers et non laitiers, ovins, caprins, équins et porcs). Le facteur d'émission associé aux bovins laitiers varie en fonction du rendement. Nous appliquons la relation affine retenue dans les inventaires français qui implique que chaque litre de lait supplémentaire est responsable d'environ 0,01 kg de CH<sub>4</sub> par tête et par an (ordonnée à l'origine de 55,7 kgCH<sub>4</sub>.tête<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>). Il en résulte que le facteur d'émission associé aux vaches laitières varie donc à la fois dans le temps et dans l'espace en fonction du rendement laitier départemental moyen fourni par AGRESTE (2008). Le facteur d'émission associé aux bovins non-laitiers varie en fonction de la composition du troupeau. En l'absence d'information plus précise pour cette catégorie, nous appliquons le facteur moyen donné dans les inventaires d'émissions pour chaque année. Les facteurs d'émissions associés aux autres catégories animales sont constants dans le temps et entre les départements.

Les émissions liées aux effluents d'élevage (EMEF) regroupent les émissions qui ont lieu durant le stockage des effluents (N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>) et les émissions de N<sub>2</sub>O (directes et indirectes) dues à l'épandage des effluents sur les sols agricoles. Les émissions de N<sub>2</sub>O dues au stockage et à la gestion dépendent des quantités d'azote produites par les animaux et du mode de stockage (liquide ou solide). Les quantités totales d'azote produites sont calculées à partir des effectifs animaux par département fournis dans AGRESTE (2008) et des quantités d'azote par tête pour chaque catégorie animale (CITEPA, 2009). Ces dernières sont constantes dans l'espace et dans le temps. Faute d'information plus désagrégée sur les modes de gestion des effluents, les quantités d'azote gérées sous formes liquide et solide sont obtenues à partir des parts moyennes nationales fournies par le CITEPA. Nous appliquons enfin les mêmes fac-

teurs d'émissions (spécifiques à chaque système de gestion) que ceux utilisés par le CITEPA. Pour ce qui est des émissions de CH<sub>4</sub>, le calcul fait intervenir des coefficients spécifiques à chaque catégorie animale (facteurs d'émissions en kgCH<sub>4</sub>.tête<sup>-1</sup>). Enfin, l'azote produit par les animaux qui retourne au sol (soit directement durant les pâtures, soit après avoir été stocké) est responsable d'émissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O qui sont calculées d'une manière similaire à celle appliquée pour EMN.

Enfin, les émissions de chacune des trois catégories sont converties en tCO<sub>2</sub>eq sur la base des pouvoirs de réchauffement global (PRG) établis par le GIEC (Solomon *et al.*, 2007). Chaque tonne de CH<sub>4</sub> est ainsi équivalente (5) à 25 tCO<sub>2</sub>eq, chaque tonne de N<sub>2</sub>O à 298 tCO<sub>2</sub>eq.

Sur l'ensemble de la période, les effluents d'élevage sont responsables de 43 % des émissions totales, et constituent ainsi la principale source d'émissions d'origine agricole (cf. tableau 1). Les émissions liées à la fermentation entérique représentent en moyenne un peu plus d'un tiers des émissions totales, les émissions dues aux engrais synthétiques, environ 22 %. Sur ces douze années, le cumul de ces trois sources s'élève à 1,1 GtCO<sub>2</sub>eq. Entre 1993 et 2003, les émissions annuelles de ces trois sources ont baissé de plus de 8 %. La comparaison des tableaux 1 et 2 permet de distinguer la variabilité annuelle et la variabilité entre les départements des émissions. Il apparaît clairement que les émissions d'origine agricole sont plus variables dans l'espace (coefficients de variation entre les départements compris 0.74 et 0.95 selon la catégorie) que dans le temps (coefficients de variation entre 0.01 et 0.07).

#### *Puits et sources liées à l'UTCF*

Comme pour les émissions d'origine agricole, le calcul des émissions nettes de cette catégorie (EMUTCF) résulte du produit de *variables d'activité* et de *facteurs d'émission*. Les variables d'activité sont données par les surfaces passant d'un usage (6) des sols à un autre entre l'an-

5. Les PRG utilisés ici correspondent à la plus récente évaluation disponible synthétisée dans le dernier rapport du GIEC. Au titre du Protocole de Kyoto, les engagements des pays sont basés sur les évaluations de 1995 (310 et 21 pour le N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> respectivement). Ce sont ces dernières valeurs qui sont utilisées dans les inventaires d'émissions français. Les valeurs pondérées par les PRG présentées dans ce texte diffèrent donc des valeurs contenues dans les inventaires établis par le CITEPA (2009).

6. Le terme « usage » ici doit être pris au sens large en ce qu'il peut recouvrir à la fois une utilisation du sol ou simplement une couverture.

née  $t-1$  et  $t$ . À chaque couple d'usage  $(i,k)$ , est associé un facteur d'émission nette correspondant à la source (+) ou au puits (-) net (exprimé en  $tCO_2eq.ha^{-1}.an^{-1}$ ) dû au passage d'un hectare dédié à l'usage  $i$  à l'année  $t-1$  à l'usage  $k$  en  $t$ . Ces facteurs d'émission peuvent varier à la fois dans le temps et l'espace.

Les données d'usage des sols sont tirées des résultats de l'enquête *TERUTI*. Cette enquête, réalisée annuellement par le Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire, collecte de manière fine des informations sur l'occupation du territoire. Une description détaillée de cette enquête est présentée en annexe 1.

Afin de correspondre aux catégories retenues dans les inventaires d'émissions, les différents

usages tels qu'ils sont définis dans l'enquête *TERUTI* sont regroupés en neuf classes (quatre concernant la forêt et deux l'agriculture) : Feuillus, Résineux, Forêt mixte, Peupleraie, Cultures, Prairies, Urbain, Zones humides et Autres. Ces catégories sont obtenues à partir d'un croisement entre les nomenclatures physique et fonctionnelle de *TERUTI* (voir annexe 1).

L'agriculture représente l'usage le plus important en termes de surface, occupant 56 % du territoire en 2003 (34 % pour les cultures, 22 % pour les prairies, voir tableau 3). L'évolution la plus marquante entre 1992 et 2003 est le recul des surfaces agricoles au profit des surfaces en forêt et des zones urbaines et artificialisées, poursuivant ainsi la dynamique déjà observée entre 1982 et 1990 (Cavailhes et Normandin, 1993). La surface agricole a ainsi diminué de 3,5 % entre 1992 et 2003, avec une

Tableau 1  
Évolution et distribution temporelle des émissions nettes par catégorie

En millions de t de CO<sub>2</sub> équivalent par an

	1993	2003	Moyenne annuelle	Écart-type	Coefficient de variation
Apports d'engrais synthétiques	21,0	19,9	22,4	1,5	0,07
Fermentation entérique	35,3	34	35,1	0,5	0,01
Effluents d'élevage	44	42	43,6	0,8	0,02
Total agriculture	100,3	95,8	101	2,3	0,02
UTCF	47,8	- 78,4	- 63	9,1	- 0,14
- Biomasse aérienne	47,8	- 77,5	- 62,2	9,0	- 0,14
- Sols	0,0	- 0,9	- 0,7	0,4	- 0,57
Émissions nettes totales	52,4	17,4	38,1	10,5	0,28

Lecture : en 1993, les émissions nettes des apports d'engrais synthétiques représentent 21,0 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent. Le coefficient de variation est le rapport de l'écart-type sur la moyenne.

Champ : France métropolitaine.

Sources : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); enquête TERUTI.

Tableau 2  
Évolution et distribution départementale des émissions nettes par catégorie

En millions de t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare et par an

	Moyenne par département		Cumul 1993-2003		
	1993	2003	Moyenne départementale	Écart-type départemental	Coefficient de variation entre les départements
Apports d'engrais synthétiques	0,37	0,35	4,3	3,2	0,74
Fermentation entérique	0,64	0,61	7,0	5,5	0,79
Effluents d'élevage	0,77	0,73	8,3	7,9	0,95
Total agriculture	1,78	1,7	19,7	13,9	0,71
UTCF	- 0,9	- 1,5	- 13	12,3	- 0,95
- Biomasse aérienne	- 0,9	- 1,4	- 12,9	12,3	- 0,95
- Sols	0,0	0,0	- 0,1	0,1	- 1,0
Émissions nettes totales	0,9	0,2	6,6	23,3	3,5

Lecture : en 1993, la moyenne départementale des émissions dues aux engrais synthétiques représente 0,37 millions de t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare.

Champ : départements de France métropolitaine.

Sources : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); enquête TERUTI.

baisse plus marquée pour les prairies (- 5,6 %) que pour les cultures (- 2,1 %). En 2003, les forêts couvrent 28 % du territoire avec 16 % de feuillus, 7 % de résineux et 6 % de forêts mixtes. L'expansion forestière (près de 0,8 million d'hectares sur la période, soit une augmentation de 5,3 %) se répartit de manière inégale entre les types de forêt (Feuillus : + 1,8 %, Forêt mixte : + 34,7 %, Peupleraie : + 11,8 %, Résineux : - 1,7 %). Les sols artificialisés (un peu moins de 9 % du territoire en 2003) sont proportionnellement ceux qui augmentent le plus sur la période, gagnant 0,7 million d'hectares sur la période (+ 17,6 %).

Ces évolutions résultent de transitions entre les différents usages qui peuvent être plus contrastées localement. L'agrégation dans le temps et l'espace peut masquer la complexité des transferts entre les différents usages. Pour le calcul des émissions liées à l'UTCF, il est donc important de ne pas s'en tenir aux seules évolutions nettes, mais de prendre en compte l'ensemble des transferts. La base de données *TERUTI* permet d'établir des matrices complètes de transition par année et par département (échelle à laquelle les données *TERUTI* sont représentatives).

La conversion des terres agricoles en forêt s'est faite plus à partir des prairies qu'à partir des cultures (cf. tableau 4). Ainsi, plus de 4 % des surfaces en prairies ont été converties en forêt de 1992 à 2003. La baisse des terres en cultures se fait principalement au profit des prairies (7,6 %) et des usages urbains (1,85 %). L'expansion des surfaces en forêt entre 1992 et 2003 provient en premier lieu des prairies, puis des friches et enfin des terres en cultures. Quant à l'augmenta-

tion des terres urbanisées, elle se fait principalement à partir des terres en cultures et en prairies ainsi qu'à partir des friches.

Les facteurs moyens d'émissions nettes sont tirés des données utilisées pour l'inventaire du CITEPA (7) (cf. tableau 5). Les quantités de carbone correspondant à chacune des cases de cette matrice sont converties en tCO<sub>2</sub>eq (1 tC=44/12 tCO<sub>2</sub>eq). Ces facteurs recouvrent les changements intervenant à la fois dans la biomasse aérienne et dans le sol. Pour ce qui concerne la biomasse forestière, ils résultent du croisement de données d'accroissement issues de l'Inventaire Forestier National (qui varie en fonction des essences, de la structure des classes d'âge et des grandes régions forestières) et des données de récoltes de bois. Les différents compartiments de carbone (bois, bois mort, litière) sont caractérisés par des dynamiques spécifiques. Il convient de noter que, par convention, le carbone stocké dans les produits du bois est considéré comme une source (8). Les facteurs associés au carbone stocké dans les sols sont tirés des estimations de stocks spécifiques à chaque couple (usage, région) établies par l'équipe INFOSOL (INRA Orléans, Arrouays *et al.*, 2001). Le calcul des facteurs annuels repose sur l'hypothèse d'une transition linéaire sur 20 ans entre le stock de carbone dans le sol associé à l'usage de départ et celui associé à l'usage d'arrivée. Dans l'ensemble, les fac-

7. Nous remercions Etienne Mathias (CITEPA) pour avoir mis à notre disposition les coefficients UTCF régionaux utilisés dans les inventaires.

8. Cet aspect fait l'objet d'un débat important au sein des instances internationales qui soulève des questions méthodologiques délicates.

Tableau 3  
Évolution des usages des sols entre 1992 et 2003

	1992		2003		Variation (%)
	Usages des sols (milliers ha)	Parts dans la surface française totale (%)	Usages des sols (milliers ha)	Parts dans la surface française totale (%)	
Cultures	19 100	34,8	18 708	34,1	- 2,1
Prairies	12 924	23,5	12 202	22,2	- 5,6
Forêts-Feuillus	8 784	16	8 943	16,3	1,8
Forêts-Résineux	3 763	6,9	3 697	6,7	- 1,7
Forêts-Mixtes	1 910	3,5	2 573	4,7	34,7
Forêts-Peupleraies	214	0,4	240	0,4	11,8
Zones urbanisées	3 942	7,2	4 637	8,4	17,6
Zones humides	880	1,6	930	1,7	5,7
Autres	3 404	6,2	2 989	5,4	- 12,2

Lecture : en 1992, la surface des terres en cultures représente 19 100 milliers d'hectares.

Champ : France métropolitaine.

Source : enquête TERUTI, calculs des auteurs.

teurs d'émissions associés à chaque case de la matrice de transition varient dans le temps en fonction de la dynamique du carbone dans les différents compartiments, de la productivité et/ou de la structure de classes d'âge des forêts. Il est important de noter que les moyennes masquent les variations interannuelles ou interdépartementales (cf. tableau 5). Ces variations sont prises en compte dans le calcul des émissions liées à l'UTCF.

Les changements d'usages de ou vers la forêt sont importants relativement aux autres changements d'usage et indiquent une dissymétrie claire entre déforestation (cf. bloc supérieur droit du tableau 5) et afforestation (bloc inférieur gauche). Le bloc inférieur droit du tableau 5 comporte un nombre important de zéros. Certains

traduisent des changements d'usages marginaux ou non pertinents (par exemple, de urbain à zone humide). D'autres reflètent le manque de connaissances actuel concernant l'impact de certains changements d'usage (par exemple, urbanisation).

Sur l'ensemble de la période, le puits net cumulé s'élève à 692,5 MtCO<sub>2</sub>eq avec une moyenne annuelle d'environ 63 MtCO<sub>2</sub>eq sur l'ensemble de la France (cf. tableaux 1 et 2). Entre 1993 et 2003, le puits net annuel a augmenté d'environ 64 %. La majeure partie du puits net lié à l'UTCF est constitué par le stockage de carbone au sein de la biomasse aérienne (98,8 %). Comme dans le cas des émissions d'origine agricole, les émissions liées à l'UTCF sont plus variables dans l'espace que dans le temps

Tableau 4  
Transferts entre usages des sols entre 1992 et 2003

En milliers ha et %

2003 1992	Cultures	Prairies	Forêts- Feuillus	Forêts- Résineux	Forêts- Mixtes	Forêts- Peupleraies	Zones urbanisées UR	Zones humides	Autres	Total 1992
Cultures	16 973 88,86 90,73	1 461 7,65 11,97	47 0,25 0,53	26 0,14 0,70	13 0,07 0,50	19 0,10 7,75	351 1,84 7,57	21 0,11 2,24	189 0,99 6,33	19 100
Prairies	1 442 11,16 7,71	10 116 78,28 82,90	204 1,58 2,28	89 0,69 2,41	211 1,64 8,21	27 0,21 11,19	377 2,92 8,13	44 0,34 4,75	413 3,19 13,81	12 924
Forêts- Feuillus	32 0,37 0,17	84 0,96 0,69	8 211 93,47 91,81	96 1,10 2,60	269 3,06 10,45	13 0,15 5,42	40 0,46 0,87	5 0,05 0,51	34 0,39 1,14	8 784
Forêts- Résineux	15 0,41 0,08	29 0,78 0,24	112 2,98 1,25	3325 88,37 89,93	235 6,24 9,13	1 0,03 0,50	16 0,44 0,35	2 0,05 0,18	27 0,72 0,90	3 763
Forêts- Mixtes	7 0,36 0,04	13 0,70 0,11	195 10,21 2,18	104 5,42 2,80	1 519 79,54 59,04	0 0,02 0,17	30 1,54 0,64	1 0,07 0,14	41 2,14 1,37	1 910
Forêts- Peupleraies	5 2,21 0,03	9 4,13 0,07	16 7,34 0,18	1 0,42 0,02	3 1,33 0,11	172 80,02 71,54	3 1,21 0,06	2 1,12 0,26	5 2,21 0,16	214
Zones urbanisées	77 1,95 0,41	87 2,21 0,72	19 0,48 0,21	8 0,20 0,22	24 0,62 0,94	1 0,02 0,35	3 658 92,79 78,87	18 0,45 1,91	50 1,27 1,68	3 942
Zones humides	9 1,07 0,05	15 1,71 0,12	5 0,55 0,05	1 0,13 0,03	4 0,47 0,16	2 0,20 0,75	15 1,70 0,32	821 93,28 88,26	8 0,89 0,26	880
Autres	148 4,34 0,79	387 11,37 3,17	135 3,95 1,50	48 1,40 1,28	295 8,66 11,45	6 0,16 2,31	148 4,35 3,19	16 0,48 1,75	2 223 65,30 74,35	3 404
Total 2003	18 708	12 202	8 943	3 697	2 573	240	4 637	930	2 989	54 920

Lecture : pour chaque case de la matrice, la première valeur correspond à la surface transférée d'un usage à l'autre, la seconde représente le pourcentage en ligne des transferts de la case, la dernière représente le pourcentage en colonne des transferts de la case.

Champ : France métropolitaine.

Source : enquête TERUTI.

(coefficient de variation dans le temps d'environ - 0,14 contre - 0,95 entre les départements). Néanmoins, les émissions liées à l'UTCF semblent être plus variables dans le temps que celles d'origine agricole. Ceci peut s'expliquer par le fait que certains phénomènes climatiques extrêmes comme la tempête de 1999 ont fortement perturbé les puits de carbone au sein de la forêt.

### Une séparation nette des sources et des puits dans l'espace

Dans cette section, nous analysons la répartition départementale de l'ensemble des sources et des puits d'émissions calculés selon la méthode présentée dans la précédente section. Afin d'atténuer l'impact de certains phénomènes annuels (climat notamment) et de ne garder que la variabilité interdépartementale des émissions de GES, nous étudions la répartition spatiale des émissions nettes cumulées sur la période de 1993 à 2003. De plus, les émissions provenant de chacune des sources sont normalisées par la surface totale des départements.

#### Émissions agricoles

Les émissions agricoles de chacune des catégories ne sont pas réparties uniformément sur l'ensemble du territoire français (cf. cartes 1-A, 1-B et 1-C). Les régions où l'élevage représente une part importante de l'activité agricole présentent

des émissions liées aux effluents d'élevage et à la fermentation entérique élevées. On peut distinguer deux pôles principaux d'où proviennent la majorité des émissions de ces deux catégories. Au nord-ouest, la Bretagne, les Pays de la Loire et la Basse-Normandie cumulent 40 % des émissions liées aux effluents et 34 % des émissions liées à la fermentation entérique. Au centre, le Limousin, l'Auvergne et la Bourgogne cumulent respectivement 15 % et 17 % des émissions de ces deux catégories.

Les émissions liées à l'apport d'engrais synthétiques, quant à elles, proviennent principalement des zones de grandes cultures et de polyculture associée à l'élevage. Au nord et au nord-est, le Nord-Pas-de-Calais, la Picardie, l'Île-de-France, la Champagne-Ardenne et la Lorraine cumulent 20 % des émissions liées aux apports d'engrais. À l'ouest, la Bretagne, les Pays de la Loire et le Poitou-Charentes sont responsables d'environ 22 % des émissions de cette catégorie. Cette répartition spatiale doit être interprétée avec précaution du fait du biais possible dû aux différences entre livraisons et consommations d'engrais dans certains départements (voir note de bas de page 4).

#### Émissions nettes (sources-puits) liés à l'UTCF

On constate une séparation nette au niveau de la diagonale nord-est/sud-ouest de la France

Tableau 5  
Coefficients de stockage (-) ou d'émissions (+) liés aux changements d'usages (moyenne 1993-2003)

En t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare et par an

i \ k	Forêt				Autres usages				
	Forêts-Feuillus	Forêts-Résineux	Forêts-Mixtes	Forêts-Peupleraies	Cultures	Prairies	Zones urbanisées	Zones humides	Autres
Forêts-Feuillus	- 4,53	-	-	-	14,36	3,30	15,01	10,41	1,56
Forêts-Résineux	-	- 4,58	-	-	11,24	3,51	9,69	8,03	2,01
Forêts-Mixtes	-	-	- 6,81	-	13,96	3,92	24,41	34,52	1,03
Forêts-Peupleraies	-	-	-	20,94	10,37	2,34	7,05	6,79	0,00
Cultures	- 7,82	- 12,13	- 7,32	- 10,44	0,00	- 3,50	0,00	0,00	0,00
Prairies	- 4,18	- 6,71	- 3,99	- 7,10	3,49	0,00	0,00	0,00	0,00
Zones urbanisées	- 4,82	- 8,04	- 4,01	- 7,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zones humides	- 4,78	- 8,42	- 3,32	- 7,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Autres	- 4,37	- 5,72	- 4,71	- 7,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Lecture : moyenne des coefficients de stockage ou d'émissions pour un hectare passant de l'usage i à l'usage k ; les zéros traduisent des changements d'usages marginaux ou non pertinents (par exemple, d'urbain à zone humide) ou le manque de connaissances actuel concernant l'impact de certains changements d'usage (par exemple, urbanisation).

Champ : départements de France métropolitaine.

Source : CITEPA (2009); calculs des auteurs.

(cf. carte 1-D). Au sein des régions situées au nord et au nord-ouest, l'UTCF constitue un puits de CO<sub>2</sub> faible, voire une source d'émissions. À l'inverse, les régions où le stockage de carbone est le plus important se situent à l'est et au sud de la France. Les régions Rhône-Alpes, Bourgogne, Franche-Comté et *Provence-Alpes-Côte d'Azur* sont ainsi responsables de 48 % du puits net de CO<sub>2</sub> lié à l'UTCF.

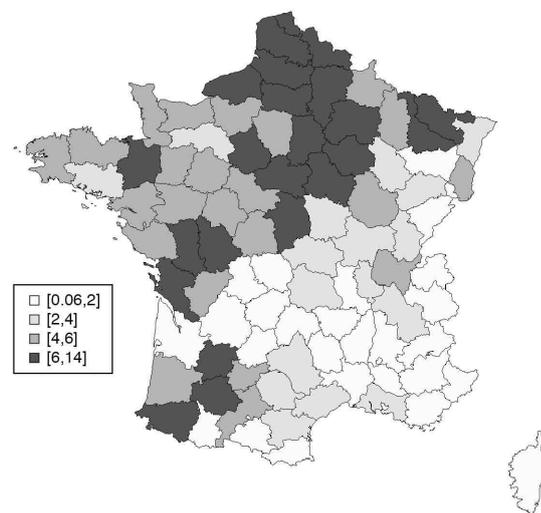
Sur l'ensemble du territoire français, le puits net lié à l'UTCF est principalement constitué par l'accroissement du stock de CO<sub>2</sub> au sein de la biomasse aérienne. Le puits net au sein de la bio-

masse représente en effet 98,8 % de l'ensemble des sources et des puits liés à l'UTCF entre 1993 et 2003. La répartition spatiale des puits nets au sein de la biomasse est donc similaire à celle de l'ensemble des émissions nettes liées à l'UTCF (cf. carte 2-A). Le puits net dans les sols représente quant à lui une part beaucoup plus faible du puits net lié à l'UTCF. On observe également une plus grande dispersion des émissions nettes liées au compartiment « sol » (cf. carte 2-B). Enfin, le puits net lié à l'UTCF résulte pour une grande part de l'accroissement du stock de carbone dans les forêts existantes plutôt que de l'accroissement des surfaces forestières.

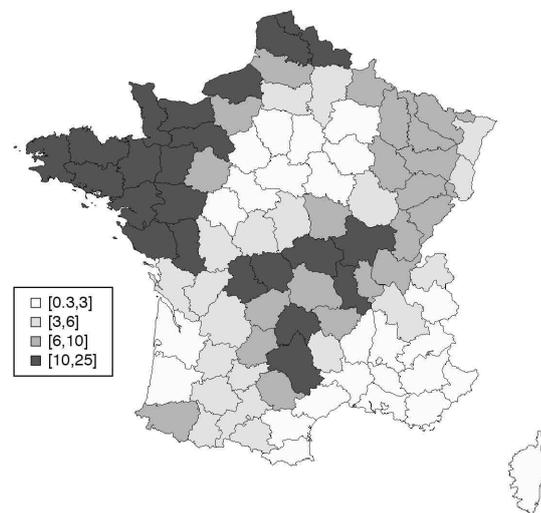
Carte 1  
Émissions nettes par catégorie (cumul 1993-2003)

En t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare

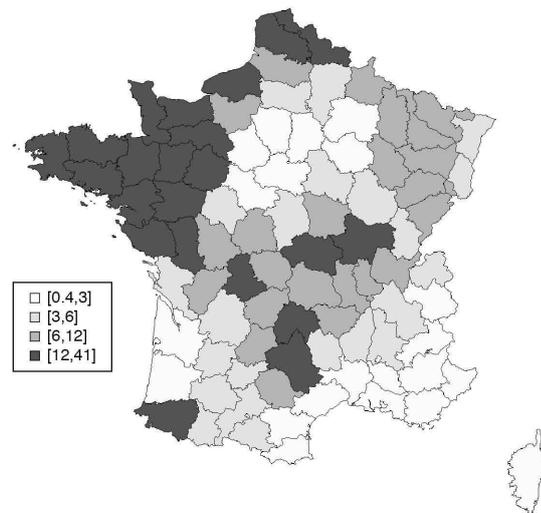
**A - Émissions dues aux engrais synthétiques**



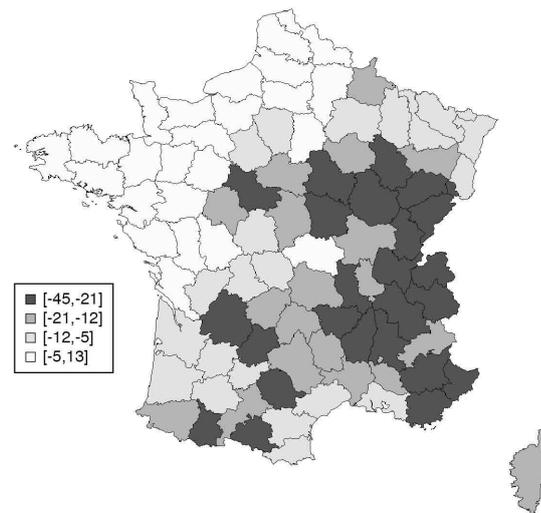
**B - Émissions dues à la fermentation entérique**



**C - Émissions dues aux effluents d'élevage**



**D - Émissions nettes liées à l'UTCF**



Lecture : les émissions sont exprimées en t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare stockées (valeurs négatives) ou émises (valeurs positives) au sein du département sur la période considérée.

Champ : départements de France métropolitaine, les émissions des départements 75, 78, 91, 92, 93, 94, et 95 d'une part et celles des départements de la Corse-du-Sud et de la Haute-Corse (2A et 2B) d'autre part ont été sommées et attribuées respectivement à une même zone géographique (région parisienne d'une part et Corse d'autre part).

Source : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); enquête TERUTI; calculs des auteurs.

### Émissions nettes totales

Les régions dont le bilan net en émissions est négatif se situent principalement dans le sud-est et l'est de la France (cf. carte 3). Ces régions sont caractérisées par des émissions agricoles faibles et un stockage de CO<sub>2</sub> important. Les régions dont les émissions nettes par hectare sont les plus importantes sont, quant à elles, situées principalement dans les régions du nord et de l'ouest du territoire français où les émissions agricoles sont importantes et où le stockage de CO<sub>2</sub> est faible. Enfin, la diagonale nord-est/sud-ouest de la France est de manière générale constituée par des départements avec un bilan net en émission autour de zéro et se situant pour la plupart dans l'intervalle interquartile. Ceci est dû au fait que leurs émissions agricoles sont compensées en partie par le stockage de CO<sub>2</sub> lié à l'UCTF.

Les variables EMEF et EMFE sont corrélées positivement (cf. tableau 6) ce qui confirme que les départements dont les émissions liées aux effluents d'élevage sont élevées ont tendance à être responsables d'importantes émissions liées à la fermentation. Ceci s'explique facilement étant donné que ces deux catégories d'émissions sont toutes les deux fortement liées à la présence d'élevage et aux effectifs animaux.

La variable EMUTCF est quant à elle corrélée positivement avec les autres variables représentant les trois catégories d'émissions agricoles

ce qui signifie que les départements où l'UCTF constitue un stockage de CO<sub>2</sub> faible ou une source d'émissions sont également responsables d'émissions agricoles élevées. Enfin, les départements dont les émissions liées aux engrais sont importantes semblent être faiblement liés à ceux dont les émissions dues à la fermentation entérique et aux effluents sont élevées comme le témoigne la faible corrélation entre la variable EMN d'une part et les variables EMEF et EMFE d'autre part. Ces résultats confirment les observations effectuées ci-dessus à savoir une séparation entre les régions avec un bilan net en émissions négatif et les régions dont les émissions nettes sont importantes.

Les observations réalisées dans cette section permettent de mettre en évidence l'existence d'une structure spatiale dans la distribution des émissions nettes. Nous nous attacherons dans la section suivante à caractériser plus précisément ces corrélations spatiales à l'aide des outils de l'analyse spatiale exploratoire.

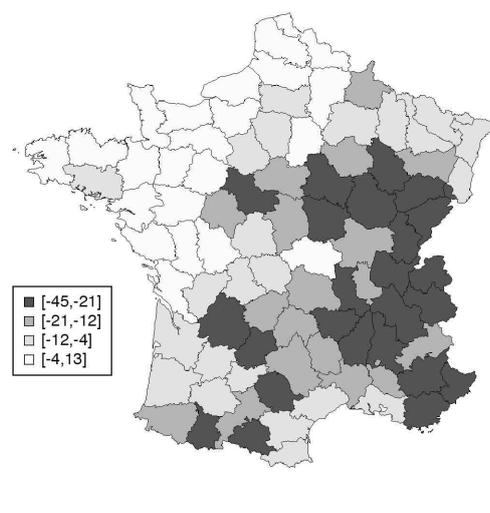
### Analyse spatiale exploratoire : autocorrélation spatiale globale positive des sources et puits

Nous nous intéressons ici à l'analyse spatiale des émissions nettes de GES. Notre analyse est essentiellement descriptive et se focalise sur les liens entre les émissions de GES agricole et leur

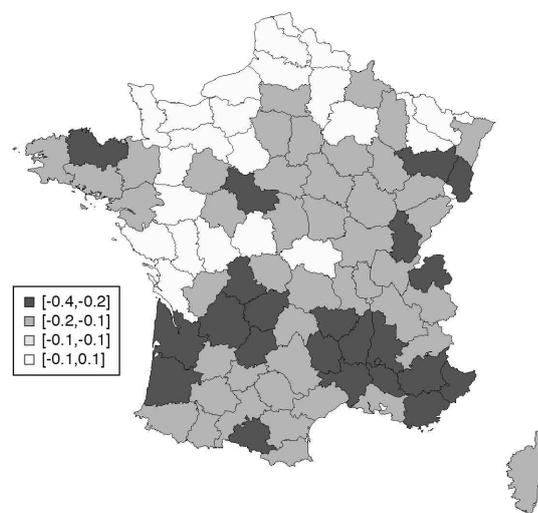
Carte 2  
Émissions nettes liées à l'UCTF par compartiment de carbone (cumul 1993-2003)

En t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare

#### A - Biomasse aérienne



#### B - Sol



Lecture : les émissions sont exprimées en t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare stockées (valeurs négatives) ou émises (valeurs positives) au sein du département sur la période considérée.

Champ : départements de France métropolitaine (cf. carte 1).

Source : CITEPA (2009); calculs des auteurs.

localisation géographique. Nous utilisons à cette fin les outils de l'analyse exploratoire des données spatiales développés par Haining (1990) ; Anselin (1998a,b). Ces outils sont présentés en annexe 2.

La statistique de Moran mesure l'autocorrélation spatiale globale (cf. annexe 2). Les statistiques *I* de Moran des émissions nettes de chacune des catégories cumulées sur la période 1993-2003 sont toutes significativement non nulles pour une valeur critique  $p = 0,0001$  (cf. tableau 7). Ainsi, le cumul des émissions sur la période 1993-2003 est positivement et spatialement autocorrélé pour les quatre catégories d'émissions :

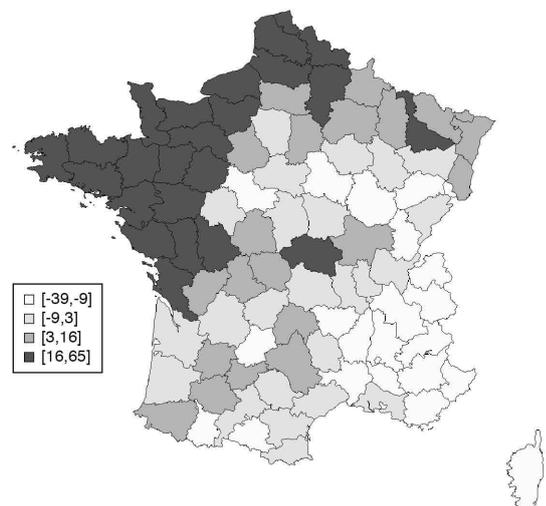
émissions dues aux engrais synthétiques (EMN), à la fermentation entérique (EMFE), aux effluents d'élevage (EMEF) et les sources/puits liés à l'UTCF (EMUTCF). Ce résultat est également valable pour les émissions nettes totales issues de ces quatre sources.

Ces résultats confirment que les départements ayant des niveaux d'émissions relativement élevés (respectivement relativement faibles) ont tendance à être localisés près d'autres départements ayant des niveaux d'émissions relativement élevés (respectivement relativement faibles).

L'évolution de la statistique *I* de Moran sur la période 1993-2003 montre que, pour toutes les catégories d'émissions, le regroupement spatial reste important (voir graphique I). L'autocorrélation spatiale mesurée par la statistique *I* de Moran demeure significative à 1 % pour toutes les années de 1993 à 2003. L'autocorrélation spatiale reste relativement stable sur la période pour les émissions dues à la fermentation entérique (EMFE) et aux effluents d'élevage (EMEF). Ceci s'explique par l'inertie temporelle des effectifs animaux. Concernant les émissions dues aux engrais synthétiques (EMN) l'autocorrélation spatiale est plus variable sur la période. En effet, ces émissions dépendent directement de l'utilisation des engrais dans l'agriculture qui peut varier d'une année à l'autre en fonction des prix du marché (prix des inputs et des outputs) mais également des conditions climatiques. Enfin, l'autocorrélation spatiale des émissions liées à l'UTCF (EMUTCF) a été marquée par une baisse importante en 2000 due aux effets de la tempête de décembre 1999. Les effets de cette tempête ont également perturbé les valeurs de l'autocorrélation spatiale pour les années 2001 et 2002.

La statistique *I* de Moran est une statistique globale qui ne nous permet pas d'évaluer la structure

**Carte 3**  
**Émissions nettes totales (agriculture et UTCF), cumul 1993-2003**  
En t de CO<sub>2</sub> équivalent par hectare



Lecture : les valeurs négatives signifient que la séquestration de CO<sub>2</sub> au sein du département correspondant est supérieure à la somme des émissions des différentes catégories.  
Champ : départements de France métropolitaine (cf. carte 1).  
Source : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); enquête TERUTI; calculs des auteurs.

**Tableau 6**  
**Corrélations entre les quatre catégories d'émissions de 1993 à 2003**

Variables	Coefficient de corrélation			
	Émissions dues aux engrais synthétiques (EMN)	Émissions dues aux effluents d'élevage (EMEF)	Émissions dues à la fermentation entérique (EMFE)	Émissions liées à l'UTCF (EMUTCF)
Émissions dues aux engrais synthétiques (EMN)	1,00			
Émissions dues aux effluents d'élevage (EMEF)	0,16	1,00		
Émissions dues à la fermentation entérique (EMFE)	0,15	0,92***	1,00	
Émissions liées à l'UTCF (EMUTCF)	0,56***	0,51***	0,52***	1,00

Lecture : corrélations entre les quatre catégories d'émissions ; \*\*\* : significatif à 1 %.  
Champ : départements de France métropolitaine.  
Source : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); enquête TERUTI; calculs des auteurs.

locale de l'autocorrélation spatiale. En particulier, elle ne permet pas de déterminer s'il existe des concentrations locales de valeurs élevées ou faibles, ni quels sont les départements qui contribuent le plus à l'autocorrélation spatiale globale, ou encore dans quelle mesure l'évaluation globale de l'autocorrélation spatiale masque des localisations atypiques ou des « poches » de

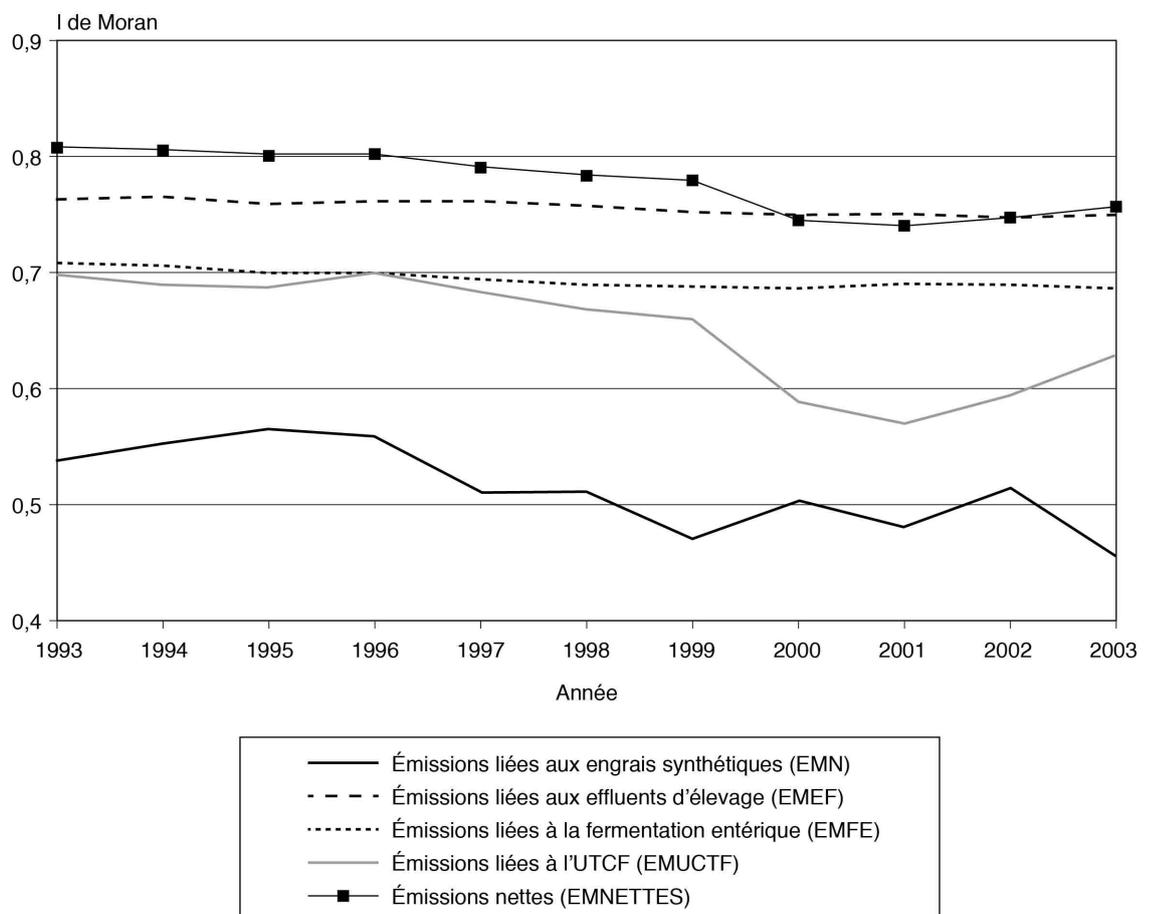
non-stationnarité locale (comme un département à fortes valeurs d'émissions de GES agricoles au milieu de départements à faibles valeurs d'émissions de GES agricoles ou, à l'inverse, un département à faibles valeurs d'émissions de GES agricoles au milieu de départements à fortes valeurs d'émissions de GES agricoles). L'analyse spatiale locale permet d'affi-

Tableau 7  
**Autocorrélation spatiale des émissions par catégorie (cumul par hectare sur la période 1993-2003)**

	Statistique I de Moran	Statistique de test z	p-value associée aux tests
Émissions dues aux engrais synthétiques (EMN)	0,55	7,58	0,000
Émissions dues aux effluents d'élevage (EMEF)	0,51	16,53	0,000
Émissions dues à la fermentation entérique (EMFE)	0,71	9,99	0,000
Émissions liées à l'UTCF (EMUCTF)	0,54	16,86	0,000
Émissions nettes totales	0,62	19,53	0,000

Lecture : la statistique de Moran pour les émissions dues aux engrais synthétiques s'élève à 0,55 (cf. annexe 2).  
Champ : départements de France métropolitaine.  
Source : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); enquête TERUTI; calculs des auteurs.

Graphique I  
**Évolution de l'autocorrélation spatiale des émissions par catégorie (évolution des statistiques I de Moran)**



Lecture : évolution des statistiques I de Moran des émissions par catégorie. L'autocorrélation spatiale pour les émissions dues à la fermentation entérique (EMFE) et aux effluents d'élevage (EMEF) reste relativement stable de 1993 à 2003.  
Champ : d de France métropolitaine.  
Source : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); Enquête TERUTI; calculs des auteurs.

ner les résultats de l'analyse spatiale globale à l'aide d'outils comme le diagramme de Moran (Anselin, 1996) et les indicateurs locaux d'association spatiale (Anselin, 1995) (cf. annexe 2).

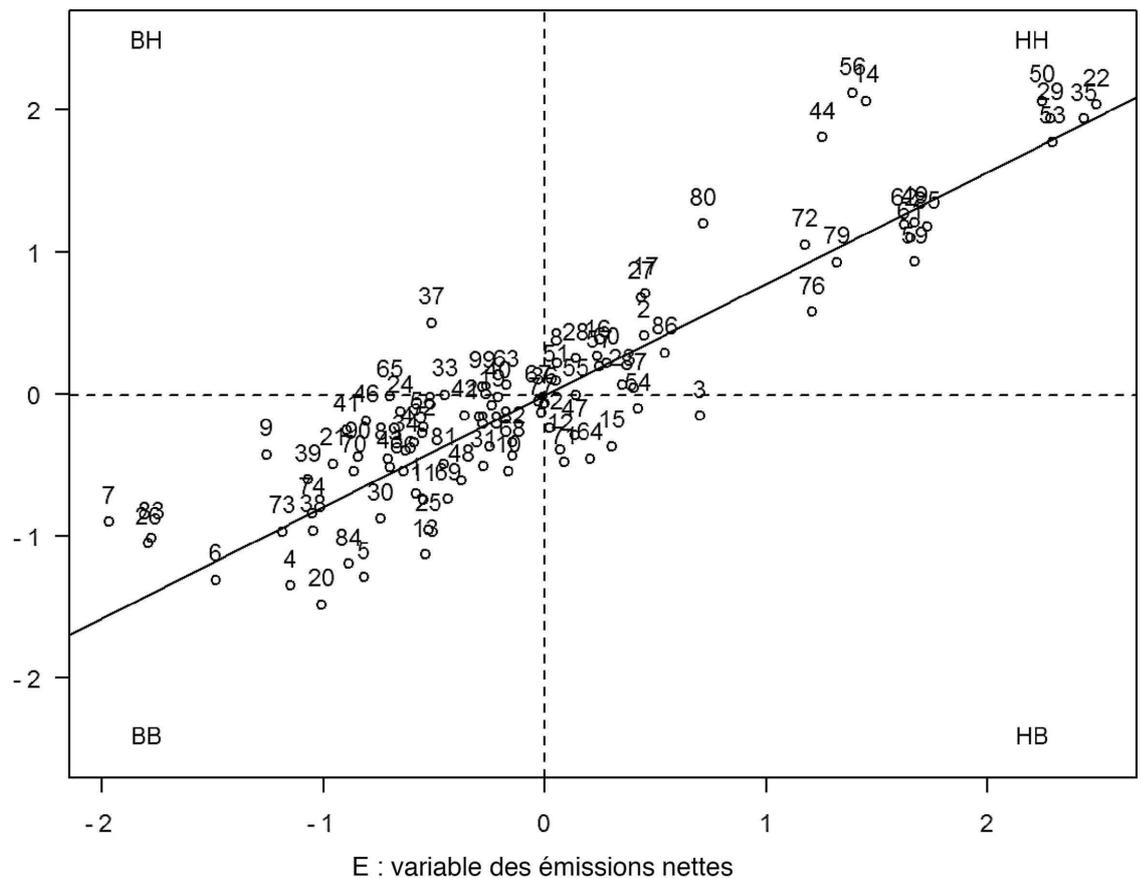
Les départements français sont caractérisés par une association spatiale positive. Le diagramme de Moran, qui illustre l'instabilité spatiale locale en représentant la variable des émissions spatialement décalée en fonction d'elle-même (cf. graphique II), permet de détecter les départements qui ont des valeurs d'émissions atypiques. Statistiquement, ce sont les départements dont les valeurs d'émissions standardisées dépassent 2 en valeur absolue. Ainsi, les départements bretons (Côtes d'Armor (22), Finistère (29) et Ille-et-Vilaine (35)) présentent des valeurs atypiques élevées par rapport à la moyenne des émissions nettes totales cumulées, ce qui s'explique principalement par l'import-

tance de l'élevage hors-sol dans cette région et donc à des émissions dues aux effluents d'élevage (EMEF) élevées. Les départements de la Manche (50) et de la Mayenne (53) montrent également des valeurs atypiques élevées pour les émissions nettes totales cumulées, ces émissions sont principalement issues de la fermentation entérique. Enfin, le département de l'Ardeche (7) présente des valeurs atypiques faibles par rapport à la moyenne des émissions nettes totales cumulées, ceci est principalement dû à des valeurs faibles pour les émissions liées à l'UTCF. Ce département présente un puits de carbone important.

Ces résultats confirment la bipolarité nette entre zones à fortes émissions dans les départements du nord-ouest et les zones à faibles émissions et stockage important dans les départements de l'est et du sud-est (cf. carte 4). Pour les trois

Graphique II  
**Instabilité spatiale locale des émissions nettes totales cumulées sur la période 1993-2003 (diagramme de Moran)**

WE : variable spatialement décalée des émissions nettes



Lecture : diagramme de Moran (cf. annexe 2) des émissions nettes par hectare cumulées sur la période 1993-2003. La variable spatialement décalée (WE en ordonnées) est représentée en fonction d'elle-même (E en abscisse). Les numéros associés à chaque point correspondent aux numéros des départements français. Enfin, les 4 quadrants sont identifiés par HH, BB, HB, BH selon que les valeurs de E et WE sont élevées (H) ou faibles (B).

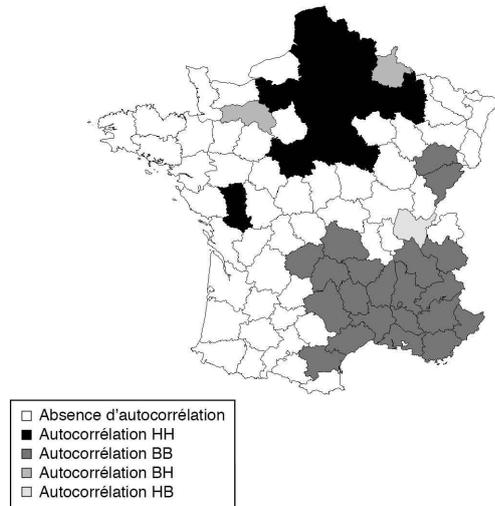
Champ : départements de France métropolitaine.

Source : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); Enquête TERUTI; calculs des auteurs.

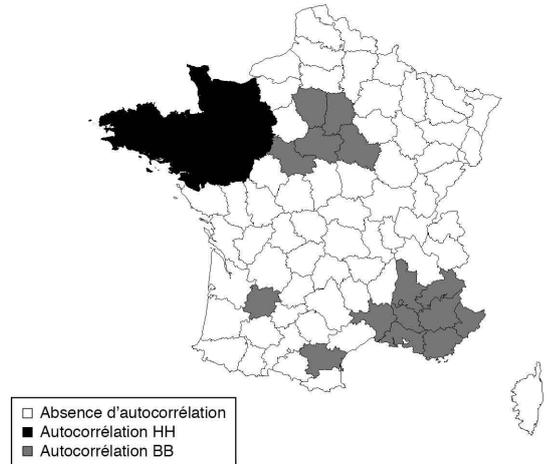
Carte 4

**Autocorrélation spatiale des émissions nettes par hectare cumulées (1993-2003) par catégorie**

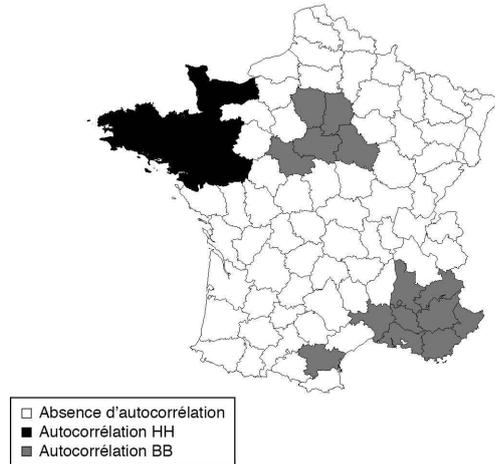
**A - Émissions dues aux engrais synthétiques**



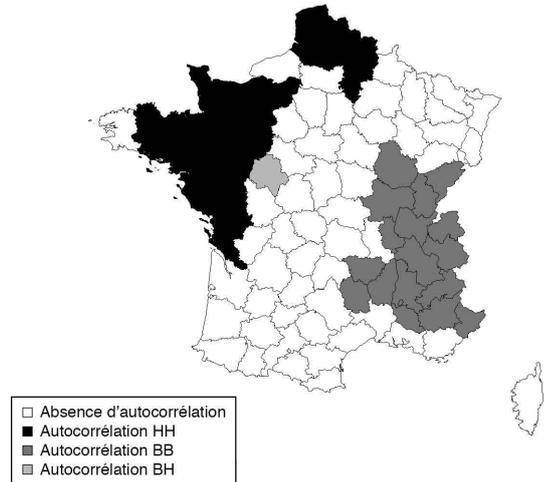
**B - Émissions dues à la fermentation entérique**



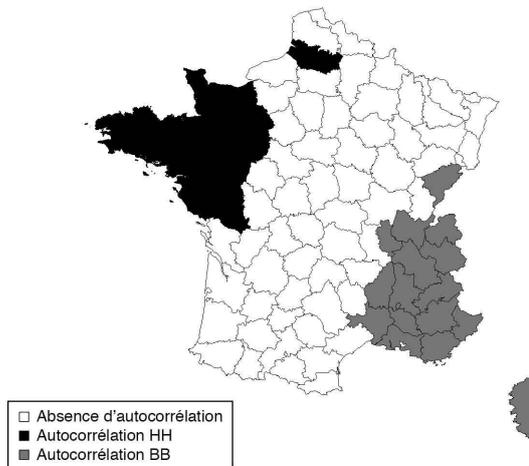
**C - Émissions dues aux effluents d'élevage**



**D - Émissions nettes liées à l'UTCF**



**E - Émissions nettes totales**



*Lecture : regroupements spatiaux des statistiques LISA (« Local indicators of Spatial Association », cf. annexe 2) des émissions nettes par hectare cumulées par catégorie (1993-2003). Ces cartes permettent de visualiser les autocorrélations spatiales locales significatives ainsi que le type d'autocorrélation pour les différentes catégories d'émission. Les niveaux de gris représentent les quadrants du diagramme de Moran (cf. graphique 2) auxquels appartient chaque département. L'absence d'autocorrélation spatiale est représentée en blanc.*

*Champ : départements de France métropolitaine (cf. carte 1).*

*Source : AGRESTE (2008); CITEPA (2009); UNIFA (2009); Enquête TERUTI; calculs des auteurs.*

sources d'émissions agricoles, on constate également une séparation nette entre les zones à fortes émissions et celles dont les émissions sont faibles. Les regroupements spatiaux des départements dont les émissions sont élevées sont différents pour les émissions liées aux engrais d'une part et pour les émissions liées à la fermentation entérique et aux effluents d'élevage d'autre part.

\*  
\* \*

Nous avons mené une analyse exploratoire des émissions françaises de gaz à effet de serre liées à la fois à l'agriculture et à l'UTCF à une échelle départementale sur la période 1993-2003. La carte des émissions nettes (totales et par catégorie) obtenue fait apparaître de fortes disparités entre les départements.

Les regroupements spatiaux mis en évidence dans notre analyse ont des conséquences pour la définition de politiques publiques de lutte contre le changement climatique. À un niveau agrégé, il est clair qu'une politique couvrant l'ensemble des émissions nettes est préférable socialement afin de limiter les « fuites » et, dans une perspective d'efficacité, de privilégier les réductions d'émissions les moins coûteuses. L'analyse, lorsqu'elle est menée à une échelle suffisamment fine, révèle que sources agricoles et puits liés à l'UTCF sont assez nettement séparés dans l'espace. Ainsi, des politiques spécifiques par source et/ou par secteur (cultures/élevage) mais bien ciblées géographiquement,

pourraient apparaître comme une solution de second rang satisfaisant.

Cette implication doit néanmoins être nuancée. Tout d'abord, une zone importante du territoire peut être considérée comme intermédiaire, dans le sens qu'elle est caractérisée par des émissions agricoles et un puits d'importance à peu près égale. Deuxièmement, notre analyse est limitée à une période relativement courte et caractérisée par des prix agricoles réels en baisse. Il sera intéressant dans des recherches futures de la prolonger jusqu'à la période récente, en incluant ainsi un contexte de variations plus marquées des prix des produits agricoles et forestiers. Troisièmement, des travaux économétriques complémentaires sont nécessaires pour affiner l'approche retenue ici pour quantifier les apports de fertilisants azotés, par exemple en complétant les données de livraisons par d'autres sources statistiques. Enfin, l'approche développée dans ce texte reste essentiellement descriptive. Elle devra être prolongée par des travaux d'économétrie appliquée mobilisant des modèles structurels permettant d'identifier et de mesurer les déterminants économiques des différentes sources d'émissions. Les résultats de cette analyse exploratoire soulignent l'importance de la prise en compte de l'autocorrélation spatiale lorsque l'on travaille à une échelle départementale. Ceci implique, dans les travaux ultérieurs d'économétrie appliquée, d'avoir systématiquement recours aux tests, aux spécifications spatiales (modèle autorégressif spatial, ou modèle spatial d'autocorrélation des erreurs) et aux outils de l'économétrie spatiale. □

---

## BIBLIOGRAPHIE

**AGRESTE (2004)**, « L'utilisation du territoire en 2003 - Nouvelle série 1992 à 2003 », *Chiffres et Données*, Série Agriculture, n° 157, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, pp. 406-414.

**AGRESTE (2008)**, « Statistique agricole annuelle : 1989-2006 définitif, 2007 provisoire », Site internet, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, France. [http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/page\\_accueil\\_82/donnees\\_ligne\\_2.html](http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/page_accueil_82/donnees_ligne_2.html).

**Anselin, L. (1988)**, *Spatial Econometrics: Methods and Models*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

**Anselin, L. (1995)**, « Local Indicators of Spatial Association - LISA », *Geographical Analysis*, vol. 27, n° 2, pp. 93-115.

**Anselin, L. (1996)**, « The Moran Scatterplot as an ESDA Tool to Assess Local Instability in Spatial Association », dans Fisher, M., Scholten, H., and Unwin, D., editors, *Spatial Analytical Perspectives on GIS*, Taylor & Francis, Londres.

**Anselin, L. (1998a)**, « Exploratory Spatial Data Analysis in a Geocomputational Environment », dans Longley, P. A., Brooks, S. M., McDonnell, R., and Macmillan, B., editors, *Geocomputation - A Primer*, Wiley, New York.

**Anselin, L. (1998b)**, « Interactive Techniques and Exploratory Spatial Data Analysis », dans Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., et Wind, D. W., editors, *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, Wiley, New York.

- Anselin, L. et Bera, A. K. (1998)**, « Spatial Dependence in Linear Regression Models with an Introduction to Spatial Econometrics », dans Ullah, A. et Giles, D. E. A., editors, *Handbook of Applied Economic Statistics*, vol. 155, pp. 237–289, Marcel Dekker, New York.
- Arrouays, D., Deslais, W., et Badeau, V. (2001)**, « The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France », *Soil Use and Management*, vol. 17, n° 1, pp. 7–11.
- Cavailhes, J. et Normandin, D. (1993)**, « Déprise agricole et boisement : état des lieux, enjeux et perspectives dans le cadre de la réforme de la PAC », *Économie et Forêt, Revue Forestière Française*, vol. XLVIII, n° 6, pp. 547–562.
- CITEPA (2009)**, « Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, Format UNFCCC-CRF », CITEPA - Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Paris.
- Cliff, A. D. et Ord, J. K. (1981)**, *Spatial Processes: Models and Applications*, Pion, Londres.
- De Cara, S. et Jayet, P.-A. (2011)**, « Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost-effectiveness, and the EU non-ETS burden sharing agreement », *Ecological Economics*, vol. 70, n° 9, pp. 1680–1690.
- De Cara, S. et Thomas, A. (2008)**, *Projections d'émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020*, Rapport final, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- Haining, R. (1990)**, *Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge.
- McCarl, B. A. et Schneider, U. A. (2001)**, « Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry », *Science*, vol. 294, n° 5551, pp. 2481–2482.
- Plantinga, A., Mauldin, T., et Miller, D. J. (1999)**, « An econometric analysis of the costs of sequestering carbon in forests », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 81, n° 4, pp. 812–824.
- Pérez Domínguez, I., Britz, W., et Holm-Müller, K. (2009)**, « Trading Schemes for Greenhouse Gas Emissions from European Agriculture: A Comparative Analysis Based on Different Implementation Options », *Review of Agricultural and Environmental Studies*, vol. 90, n° 3, pp. 287–308.
- Richards, K. R. et Stokes, C. (2004)**, « A Review of Forest Carbon Sequestration Cost studies: A Dozen Years of Research », *Climatic Change*, vol. 63, n° 1-2, pp. 1–48.
- Schneider, U. A., McCarl, B. A., et Schmid, E. (2007)**, « Agricultural Sector Analysis on Greenhouse Gas Mitigation in US Agriculture and Forestry », *Agricultural Systems*, vol. 94, n° 2, pp. 128–140.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., et Yu, T.-H. (2008)**, « Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change », *Science*, vol. 319, n° 5867, pp. 1238–1240.
- Simm, G. (2010)**, « Guest editorial: Livestock and global climate change », *Animal*, vol. 4, n° 3, pp. 321–322.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., et Miller, H., editors (2007)**, « Climate Change 2007 : The Physical Science Basis », contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC Fourth Assessment Report (AR4)*, Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., et de Haan, C. (2006)**, « Livestock's long shadow. Environmental issues and options », FAO report, FAO, Rome.
- UNIFA (2009)**, « Les livraisons de fertilisants minéraux en France métropolitaine 1989-2009 », Communication personnelle, Union des Industries de la Fertilisation Azotée, Paris.
- van Kooten, G. C. et Sohngen, B. (2007)**, « Economics of Forest Ecosystem Carbon Sinks: A Review », *International Review of Environmental and Resource Economics*, vol. 1, n° 3, pp. 237–269.
- Winiwarter, W. et Rypdal, K. (2001)**, Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories : a case study for Austria, *Atmospheric Environment*, vol. 35, n° 32, pp. 5425 – 5440.

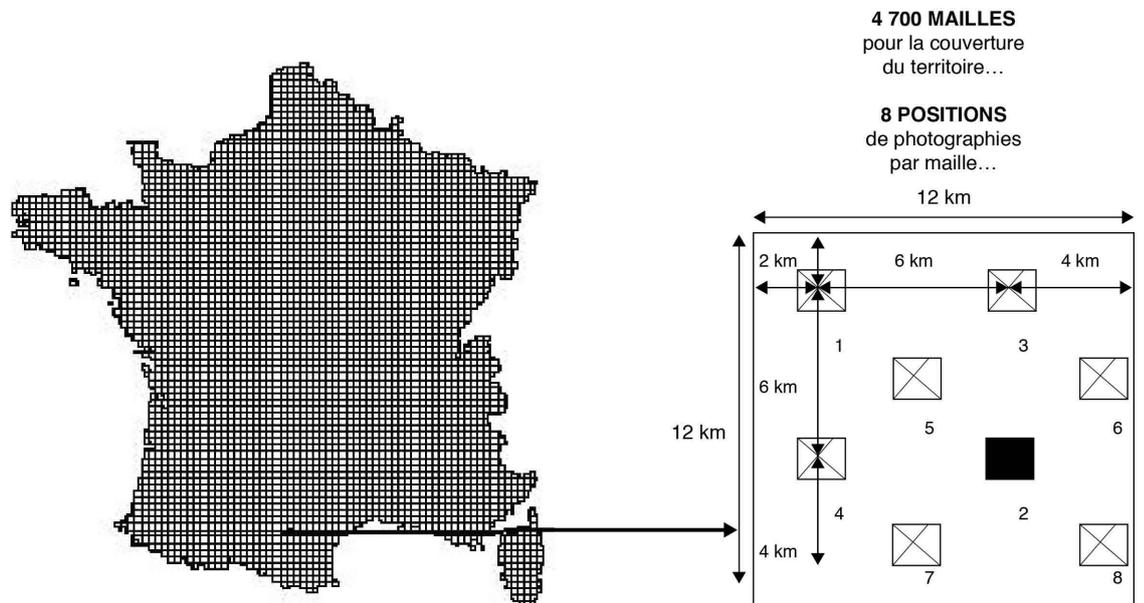
PRÉSENTATION DE L'ENQUÊTE *TERUTI*

L'enquête *TERUTI* est une enquête annuelle réalisée par le Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire. La méthode de l'enquête *TERUTI*, pour la période entre 1981 et 2003, repose sur la détermination de points générés à partir d'un échantillon de 15 579 photographies aériennes qui sont réparties régulièrement sur l'ensemble du territoire métropolitain (voir graphique 3). Chaque photographie porte une grille de 36 points, portant ainsi à 555 903 le nombre total de points enquêtés. Les enquêteurs localisent sur le terrain, de manière précise, les points à observer et déterminent chaque année, pour chacun d'entre eux, une occupation physique et une utilisation fonctionnelle.

Le tirage de l'échantillon est un tirage systématique à deux degrés comme le montrent les graphiques 3 et 4. Ce type de tirage assure une répartition satisfaisante de l'échantillon sur l'ensemble du territoire :

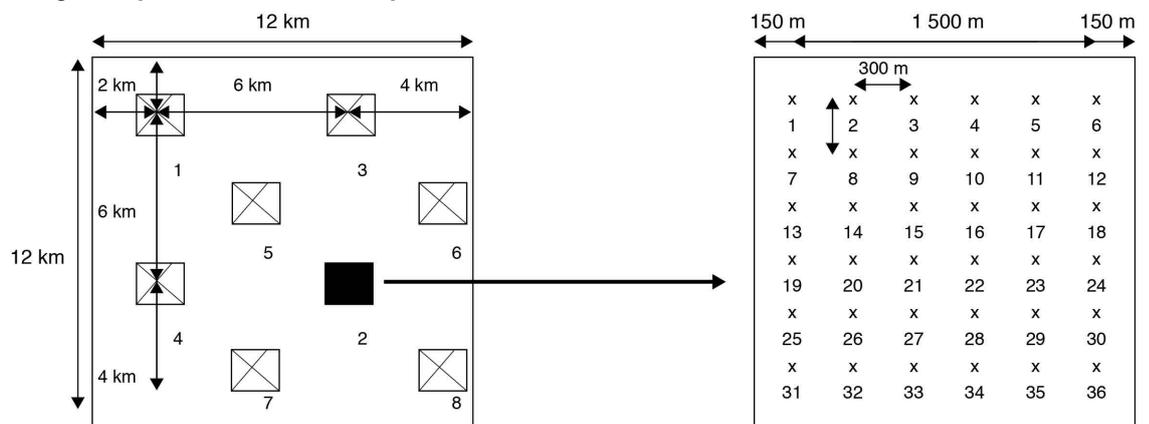
- 1er degré : tirage de photographies aériennes. Le tirage revient à recouvrir la France d'un quadrillage de mailles de 12 km x 12 km chacune, dans les directions nord-sud et est-ouest. Le nombre de mailles est de 4 700. À l'intérieur de chacune de ces mailles, huit photographies de position fixe ont été prévues. Du fait de contraintes de coût, seules les photographies des positions 1, 2, 3 et 4 distantes les unes des autres de 6 km environ, ont été retenues, sauf pour Paris, la Couronne parisienne et le Territoire de Belfort qui enquêtent également, pour des raisons de représentativité des résultats

Graphique 3

Tirage des photographies aériennes au sein de l'enquête *TERUTI*

Source : AGRESTE (2004).

Graphique 4

Tirage des points au sein de l'enquête *TERUTI*

Source : AGRESTE (2004).

au niveau départemental, les photographies des positions 5, 6, 7 et 8.

- 2ème degré : tirage des points. Le tirage systématique revient à reporter sur chacune des photographies aériennes une grille de 36 points à enquêter, alignés de 6 en 6. Sur le terrain, les points sont distants d'environ 300 mètres et désignent chacun une superficie d'environ 10 m<sup>2</sup>.

Chaque point identifie une portion homogène du territoire du point de vue de l'occupation du sol. Après localisation sur le terrain, on attribue à cette portion homogène un poste et un seul parmi les 81 postes de la nomenclature physique et un poste parmi les 25 postes de la nomenclature fonctionnelle (voir les détails de ces nomenclatures dans les tableaux 8 et 9).

L'occupation physique est celle déduite directement de l'observation de la portion homogène. Les 81 postes de la nomenclature décrivent les eaux permanentes et sols humides (11 à 15), les sols à roche mère affleurante (16 et 17), les sols à couverture boisée (18 à 26), les sols agricoles utilisés (27 à 67), les sols ni altérés ni bâtis (68 à 73), les sols artificialisés non bâtis (74 à 84) et les sols bâtis (85 à 91)

L'utilisation fonctionnelle est moins directe et parfois plus délicate à déterminer : elle doit renseigner sur la destination socio-économique du territoire observé. Les 25 postes décrivant la production primaire (minière, agricole, ligneuse, piscicole) la production secondaire (industrie, énergie) ainsi que les sols à vocation de services et diverses utilisations (réseau, commerce,

Tableau 8  
Nomenclature physique de *TERUTI*

<p><b>EAUX PERMANENTES ET ZONES HUMIDES</b>            11 - Marais salants, étangs d'eau saumâtre            12 - Lacs, bassins, étangs d'eau douce            13 - Rivières (y compris estuaires), canaux            14 - Marais, zones humides (y compris marécages et tourbières) sans utilisation agricole particulière            15 - Glaciers, neiges éternelles</p> <p><b>SOLS A ROCHE MERE AFFLEURANTE</b>            16 - Rochers, éboulis            17 - Dunes blanches, plages de sable ou de galets</p> <p><b>SOLS A COUVERTURE BOISEE</b>  <b>Bois et Forêts</b>            18 - Feuillus            19 - Résineux            20 - Boisement à faible densité            21 - Mixtes  <b>Superficies boisées hors forêts</b>            22 - Bosquets            23 - Arbres épars  <b>Peupleraies</b>            24 - Peupleraies en plein            25 - Peupleraies associées            26 - Peupliers épars</p> <p><b>SOLS AGRICOLES UTILISES</b>            27 - Blé            28 - Orge et escourgeon            29 - Avoine            30 - Maïs            31 - Seigle            32 - Mélanges et autres céréales            33 - Betteraves            34 - Plantes textiles            35 - Tournesol            36 - Colza oléagineux, navette            37 - Autres cultures industrielles oléagineuses            38 - Autres cultures industrielles            39 - Pommes de terre            40 - Pois et petits pois            41 - Fèves, féveroles            42 - Autres légumes            43 - Pépinières (y compris forestières), fleurs et plantes ornementales            44 - Plantes sarclées fourragères            45 - Autres cultures fourragères annuelles            46 - Prairies artificielles            47 - Prairies temporaires            48 - Prairies permanentes ou naturelles productives            49 - Alpages et estives            5D - Superficie en herbe à faible productivité</p>	<p>51 - Prés-vergers            52 - Jachères            53 - Abricotiers (en culture pure)            54 - Cerisiers (en culture pure)            55 - Pêchers (en culture pure)            56 - Pruniers (en culture pure)            57 - Poiriers (en culture pure)            58 - Pommiers (en culture pure)            59 - Mélanges des 6 espèces            60 - Autres espèces fruitières que les 6 (culture pure ou en mélange)            61 - Association des 6 espèces avec des productions autres que fruitières            62 - Association des autres espèces que les 6 avec des productions autres que fruitières            63 - Vignes (en culture pure)            64 - Association vigne-verger des 6 espèces            65 - Association vigne-autre culture            66 - Petits fruits et autres cultures diverses            67 - Jardins familiaux à dominante potagère</p> <p><b>AUTRES SOLS NI ALTERES NI BATIS</b>            68 - Pelouses d'agrément et autres superficies en herbe            69 - Friches            70 - Landes            72 - Haies            73 - Chemins de terre ou enherbés</p> <p><b>SOLS ARTIFICIALISES NON BATIS</b>            74 - Chantiers (bâtiments et travaux publics)            75 - Autres sols à profil altéré par extraction (carrières...)            76 - Autres sols à profil altéré par dépôt (décharges...)            77 - Cimetières            78 - Terrains vagues urbains            79 - Cours de ferme, annexes            80 - Sols revêtus ou stabilisés de forme aréolaire arborés            81 - Sols revêtus ou stabilisés de forme aréolaire nus            82 - Sols revêtus ou stabilisés de forme linéaire arborés            83 - Sols revêtus ou stabilisés de forme linéaire nus            84 - Jardin d'agrément à structure complexe</p> <p><b>SOLS BATIS</b>            85 - Volumes construits, clos et couverts, de hauteur faible            86 - Volumes construits, clos et couverts de hauteur moyenne et forte            87 - Serres            88 - Volumes construits, couverts seulement            89 - Volumes construits temporaires            90 - Autres volumes de génie industriel et civil            91 - Volumes construits abandonnés (y compris les ruines)  <b>99 - Zones interdites</b></p>
---	---

Source : AGRESTE (2004).

Tableau 9  
Nomenclature fonctionnelle *TERUTI*

<p><b>- Production primaire</b> 01 - Production minière 02 - Production agricole 03 - Production agricole occasionnelle 04 - Production ligneuse 05 - Production piscicole</p> <p><b>- Production secondaire</b> 06 - Industrie 07 - Energie</p> <p><b>- Services et divers</b> 08 - Réseau routier permanent 09 - Réseau ferroviaire 10 - Réseau fluvial et maritime 11 - Réseau aérien</p>	<p>12 - Autres réseaux (adduction d'eau...) 13 - Commerce et artisanat de service 14 - Administrations et collectivités locales 15 - Armée 16 - Enseignement et recherche 17 - Culture 18 - Lieux de culte 19 - Equipements sociaux et sanitaires 20 - Sports et loisirs de plein air 21 - Habitat individuel 22- Habitat collectif 23 - Dépôts et décharges en général 24 - Protection réelle du milieu</p> <p>99 - Absence d'usage ou non utilisation temporaire</p>
--	--

Source : *AGRESTE (2004)*.

équipements, habitat, etc.). Dans de nombreux cas l'observation physique suffit à déterminer l'utilisation fonctionnelle. Quand cela n'est pas possible une interprétation tenant compte de l'environnement immédiat est nécessaire. Notons par exemple les différences entre classification fonctionnelle et physique des sols agricoles. Selon la classification fonctionnelle les sols agricoles comprennent les sols agricoles utilisés (cultures, prairies, etc.) ainsi que des sols physiquement non agricoles, par

exemple des pelouses, landes ou friches mais à fonction agricole lorsque l'environnement est agricole. La surface agricole utilisée représente 96 % de la surface agricole fonctionnelle.

Depuis 2004, l'enquête *TERUTI* a évolué vers une nouvelle enquête *TERUTI-LUCAS* pour répondre à de nouvelles demandes tout en assurant au maximum la continuité avec les résultats précédents de *TERUTI*.

## L'ANALYSE SPATIALE EXPLORATOIRE

L'analyse exploratoire des données spatiales est un ensemble de techniques destinées à décrire et visualiser les distributions spatiales (tendances spatiales et autocorrélation spatiale globale) et à repérer les schémas d'association spatiale (*clusters* spatiaux et autocorrélation spatiale locale). La première étape de l'analyse exploratoire consiste à évaluer l'autocorrélation spatiale globale au sein des données afin de déterminer si, globalement, il existe une concentration spatiale de départements similaires en termes d'émissions de GES. La seconde étape de l'analyse consiste à expliciter les concentrations spatiales en distinguant les départements à fortes et à faibles valeurs d'émissions de GES à l'aide du diagramme de Moran et des statistiques LISA.

L'autocorrélation spatiale exprime l'absence d'indépendance entre observations géographiques. La définition de l'autocorrélation spatiale selon Anselin et Bera (1998) est la suivante : « *Spatial autocorrelation can be loosely defined as the coincidence of value similarity with location similarity* » (l'autocorrélation spatiale peut être définie comme la coïncidence entre des valeurs similaires dans des localisations voisines). Par conséquent, l'autocorrélation spatiale est positive lorsque des valeurs élevées ou faibles d'une variable aléatoire tendent à se concentrer dans l'espace, l'autocorrélation spatiale est négative lorsque les unités géographiques tendent à être entourées par des unités géographiques voisines présentant des valeurs très différentes et il y a absence d'autocorrélation spatiale lorsque la caractéristique d'un lieu est indépendante de ce qui se passe chez ses voisins. L'existence d'autocorrélation ou l'absence d'autocorrélation globale peut cacher des phénomènes différents au niveau local. L'analyse de ressemblance entre lieux doit donc se mener aussi bien au niveau global que local.

Pour modéliser les interactions spatiales, il est nécessaire d'imposer une structure sur le voisinage. Il s'agit de définir la matrice de poids,  $W$ , matrice carrée d'ordre  $N$  ( $N$  = nombre d'observations), où chaque terme  $w_{ij}$  représente la façon dont la localisation  $i$  et la localisation  $j$  sont connectées spatialement. Ces matrices se classent dans deux grandes catégories : les matrices de contiguïté et les matrices de poids basées sur la distance. Nous utilisons dans ce papier une matrice de poids basée sur la contiguïté. La Corse, n'étant contiguë avec aucun département, est définie comme voisine avec les deux départements côtiers les plus proches à savoir le Var et les Alpes-Maritimes. Nous avons testé une matrice de poids basée sur la distance minimale permettant à chaque département d'avoir au moins un voisin. Les résultats concernant l'autocorrélation spatiale globale étaient similaires mais l'analyse spatiale locale révélait des regroupements spatiaux locaux non pertinents du fait du grand nombre de voisins obtenus pour certains départements à cause de la distance importante séparant la Corse de la côte.

La mesure de l'autocorrélation spatiale globale est traditionnellement fondée sur la statistique de Moran (Cliff et Ord, 1981) définie sous la forme suivante :

$$I = \frac{N}{S} \sum_{i \neq j} w_{ij} \frac{(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Où  $x_i$  est l'observation dans le département  $i$  pour la variable étudiée,  $\bar{x}$  la moyenne des observations,  $N$  le nombre de départements,  $w_{ij}$  l'élément de la matrice de poids entre les départements  $i$  et  $j$  et  $S$  un facteur d'échelle égal à la somme de tous les éléments de  $W$ .

La statistique  $I$  de Moran permet de mesurer le degré d'association linéaire entre le vecteur des valeurs observées et le vecteur des moyennes spatialement pondérées des valeurs voisines appelé variable spatialement décalée. Des valeurs de  $I$  plus grandes (resp. plus petites) que l'espérance mathématique  $E(I) = \frac{p-1}{N-1}$  indiquent une autocorrélation spatiale positive (resp. négative).

Le test de significativité de la statistique  $I$  de Moran, dont l'hypothèse nulle est l'absence d'autocorrélation, est effectué à l'aide d'une procédure de permutation proposée par Anselin (1995), dans laquelle une distribution de référence est générée empiriquement pour le  $I$  de Moran. On obtient alors des pseudo-niveaux de significativité qui permettent de conclure sur le test.

L'instabilité spatiale locale est analysée à l'aide du diagramme de Moran (Anselin, 1988), qui représente la variable spatialement décalée en fonction d'elle-même. Il partage le plan en quatre quadrants qui correspondent aux quatre différents types d'association spatiale existant entre un département et ses voisins. Les quadrants HH (un département associé à une valeur élevée entouré de départements associés à des valeurs élevées) et BB (un département associé à une valeur faible entouré de départements associés à des valeurs faibles) représentent une autocorrélation spatiale positive car ils indiquent un regroupement spatial de valeurs similaires. En revanche, les quadrants BH (un département associé à une valeur faible entouré de départements associés à des valeurs élevées) et HB (un département associé à une valeur élevée entouré de départements associés à des valeurs faibles) représentent une autocorrélation spatiale négative car ils indiquent un regroupement spatial de valeurs dissemblables. Par conséquent, le diagramme de Moran permet de détecter les localisations atypiques, c'est-à-dire les départements dont l'autocorrélation dévie du schéma global d'association spatiale. Il s'agit des départements qui se trouvent dans le quadrant BH (« mouton noir ») ou dans le quadrant HB (« îlot de richesse »). L'autocorrélation spatiale globale peut également être visualisée sur ce graphique puisque la statistique  $I$  de Moran est formellement équivalente à la pente de la régression linéaire en utilisant une matrice de poids standardisée.

Le Moran local ou LISA (*Local indicators of Spatial Association*) est une statistique d'autocorrélation locale qui répond à deux critères (Anselin, 1995). D'une part le LISA donne pour chaque observation une indication sur le regroupement spatial significatif des valeurs similaires autour de cette observation. D'autre part, la somme des LISA des observations est proportionnelle à un indice global d'association spatiale. La moyenne des Moran locaux correspond à l'indice de Moran global. Cet indice est basé sur des covariances spatiales et peut être utilisé comme indice de regroupement spatial local. De plus, il

indique les régions contribuant le plus à l'autocorrélation globale.

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m_0} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

pour tous départements  $i$  et  $j$  voisins avec

$$m_0 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

Les statistiques LISA permettent également de compléter les informations contenues dans les diagrammes de Moran en fournissant plus d'information sur la significativité des regroupements spatiaux dans les quatre quadrants : HH, BB, BH et HB.

