
LA FORÊT FACE AU RISQUE TEMPÊTE : VERS D'AUTRES APPORTS DE L'ANALYSE SPATIALE

Joël Boulier : UMR Géographie-cités 13 rue du Four 75006 Paris
joel.boulier@univ-paris1.fr

Claude Grasland : UMR Géographie-cités 13 rue du Four 75006 Paris
claude.grasland@parisgeo.cnrs.fr

RÉSUMÉ. Suite aux tempêtes de décembre 1999, de nombreuses études ont été lancées dans le but de mieux appréhender l'impact et le comportement des tempêtes en milieu forestier. Les réponses apportées reposent souvent sur le peuplement affecté lui-même, que ce soit à un niveau d'observation de l'individu « arbre » ou à celui du peuplement. En revanche, il y a peu de questionnement sur l'environnement spatial des zones sinistrées. Dans ce cadre, nous proposons une approche différente de compréhension du fonctionnement des tempêtes en introduisant une très forte dimension spatiale à l'analyse de ce risque « tempête » et à celle de la sensibilité des peuplements forestiers. Les méthodes d'interactions spatiales nous semblent être des pistes prometteuses pour résoudre le problème posé. Deux grands axes de réflexion sont explorés :

- en prenant en compte l'orientation des flux d'air, nous cherchons à mettre en évidence l'interaction entre mode d'occupation du sol et zones sinistrées, selon des critères de distance et de nature de l'interaction spatiale (approche par les potentiels...);
- par ailleurs, nous orientons également nos travaux sur les interactions entre dégâts et ouvertures de structures (lacunes et enclaves) telles que chemins, carrefours, routes, clairières...

Ce programme ambitieux, outre ses propositions méthodologiques, cherche aussi à répondre à une réelle attente des acteurs de la forêt : peut-on se prémunir face au risque « tempête » ?

ABSTRACT. *Following the storms of December 1999, many studies were launched with an aim of better apprehending the impact and the follow-up of the storms in forests. The answers brought often rest on the affected settlement itself, that it is on a level of observation of the individual "tree" or on the level of observation of the settlement. But there is little questioning on the spatial environment, more of the zones disaster victims. Within this framework, we propose an approach different from the study of the storms by introducing a very strong space dimension with the analysis of the storms risk and of the sensitivity of the forest settlements. "Space Interactions" methods seem to be promising tracks to solve the problem which is posed to us. Two large axes of reflection are explored:*

- *by taking of account the orientation of flows of air, we seek to highlight the interaction between types of land uses and disaster victims zones, according to criteria of distance and of nature of the space interaction (potentials approach...);*
- *in addition, we also direct our work towards the interactions between damages and openings of structures (gaps and enclaves) such as ways, crossroads, roads, clearings...*

This ambitious program, in addition to its methodological propositions, also seeks to answer real waiting of the actors of the forest: can one secure himself faced with the storm risk?

MOTS-CLÉS : interaction spatiale, potentiels, discontinuités, risque, forêt

KEYWORDS: *spatial interaction, potentials, discontinuities, risk, forest*

Les 26 et 27 décembre 1999, des vents de plus de 150 km/h ont défrayé la chronique : l'impact de ces tempêtes restera un événement, dont on parlera encore longtemps comme LA tempête. Les dégâts matériels ont atteint plus de 15 milliards d'euros... Dans ce cadre exceptionnel, la forêt marquera particulièrement les esprits avec 138 millions de mètres-cubes de bois à terre, 900 000 hectares touchés... La filière bois restera pour longtemps choquée, par les coûts induits, mais aussi par des problèmes structurels ou encore de gestion : peut-on se prémunir des dégâts tempétueux ? Doit-on assurer les propriétés forestières face à ce risque ? Autant de questions sans réponse nette. Dans ce contexte, le Ministère de l'Agriculture a lancé un bon nombre d'études. Plusieurs d'entre elles portent sur le peuplement affecté lui-même (individu arbre ou peuplement : rôle des systèmes racinaires, études des stations...).

Si certains facteurs spatiaux montrent en effet une relation de cause à effet, ceux-ci restent peu nombreux. Nous pourrions illustrer ceci par le contre-exemple de l'épicéa, qui a souvent été complètement rasé dans notre forêt d'étude. Mais comment expliquer, toutes choses égales par ailleurs, la diversité de l'intensité des autres dégâts ? Pourquoi deux peuplements similaires en âge, pente, sols, essences... ont un comportement si variable face à la tempête ? Il nous semble dès lors important de prendre du recul par rapport au local et à la maille d'observation. C'est pourquoi nous tenterons ici de prendre en considération l'environnement spatial des zones étudiées : la méthode proposée repose sur la notion de potentiel et la construction de mesures de voisinage. Ainsi, nous espérons ouvrir des pistes de travail assez originales, qui devraient permettre de mieux comprendre le phénomène dévastateur qui s'est abattu sur les forêts.

1. Un massif forestier comme base de réflexion : premiers constats autour du maillage

Nous appuierons notre réflexion sur l'application de la méthode des potentiels aux dégâts subis en forêt de Breteuil-sur-Iton (Eure, France), et plus précisément dans le secteur forestier du Huttier (1 300 hectares contigus).

Ce massif présente des conditions d'étude idéales :

- le propriétaire et son gestionnaire se sont investis dans la collaboration ;
- nous pouvons faire abstraction dans un premier temps de la nature du sol, de la pente (quasi-nulle, régulière), des variations du vent ;
- la société d'assurances qui couvre le Groupement Forestier de Conches-Breteuil, a dépêché sur place un expert qui a relevé, au 1/5000, toutes les zones de dégâts et leur intensité (chiffrage des dommages subis) ;
- une mission aérienne complète sur le massif a été organisée dans les quelques jours qui ont suivi les incidents ;
- la gestion fine du massif est suivie et les données aisément disponibles dans le cadre de cette étude¹ (peuplements, coupes...)

Ainsi, pour appréhender le fonctionnement des tempêtes sur ce massif, disposons-nous de données nombreuses, mais hétérogènes, tant dans leur nature que dans les niveaux d'observation (cartographie des dégâts, peuplements, assiette des coupes, parcellaire...).

Afin de mettre en relation des indicateurs de nature différente, nous nous heurtons dans un premier temps à l'obstacle des maillages hétérogènes. De fait, confronter les facteurs qui pourraient influencer le comportement des peuplements forestiers face aux vents, nous mène à effectuer un certain nombre de constats préalables :

- un champ de vent est éminemment spatialement continu ;
- les mailles d'observation des grandeurs forestières ne sont pas toutes les mêmes : or, si la description de deux phénomènes ne peut se faire à travers la même maille, (vent et hauteur des peuplements, par exemple, ou intensité des dégâts et pénétrabilité), ils sont tout de même bien au même endroit, au même moment ;
- les choix de découpage de l'espace ont été faits en vue de la gestion forestière : il s'agit donc d'un découpage *a priori* qui n'est pas nécessairement pertinent pour l'étude des facteurs de dégâts en forêt. Les données ont été spatialement discrétisées en fonction de l'information utile au gestionnaire (homogénéité des peuplements par exemple). Mais cette homogénéité est très relative à l'unité d'observation : que deviendrait-elle si le relevé du peuplement se faisait non plus au niveau de « sous-parcelles » liées à la gestion mais au niveau de surfaces plus petites (telles celles de l'échantillonnage de l'IFN) ?
- De fait, des discontinuités spatiales apparaissent : or, ce n'est pas nécessairement le phénomène observé qui les induit, mais peut-être le maillage lui-même. Par exemple, les limites entre taillis-sous-futaie et futaie feuillue ne sont pas toujours très nettes ; il suffit de se déplacer en forêt avec une carte des peuplements pour s'en rendre compte (Boulier, 1995) ;

¹ que M. Masset, gestionnaire de « Forêts et Gestion » (Nanterre), en soit ici remercié le plus vivement qu'il soit.

- l'analyse statistique des informations se trouve alors prise en étau entre un maillage trop grossier qui ne permettrait pas la perception de phénomènes locaux et un maillage plus fin augmentant la variance de la série statistique : ce biais ne pourrait être acceptable que si le maillage est homogène.

De ces premiers constats ressort la nécessité de générer un type d'information qui permette la comparaison, la mise en rapport de deux phénomènes, initialement connus dans des mailles pouvant être différentes (coupes, volumes, essences forestières, dégâts...). Une première difficulté apparaît : s'affranchir du maillage de collecte et donner une vision continue à un phénomène spatial discrétisé.

2. Le lissage cartographique face au biais de l'hétérogénéité

Les travaux antérieurs de C. Grasland *et al.* sur la reformulation probabiliste du concept de potentiel de population ont servi de fondement au développement d'un ensemble d'outils adaptés à l'analyse de la distribution spatiale de phénomènes discrets, c'est-à-dire de phénomènes concernant des individus élémentaires (hommes, arbres, entreprises...) et leurs attributs (Grasland, 1991 ; Boursier-Mougenot *et al.*, 1993). Les outils statistiques ou géostatistiques habituellement utilisés pour l'étude de phénomènes continus - définis en tous points de l'espace - tels que la température ou l'altitude ne sont en effet pas toujours transposables à l'étude de ces phénomènes discrets.

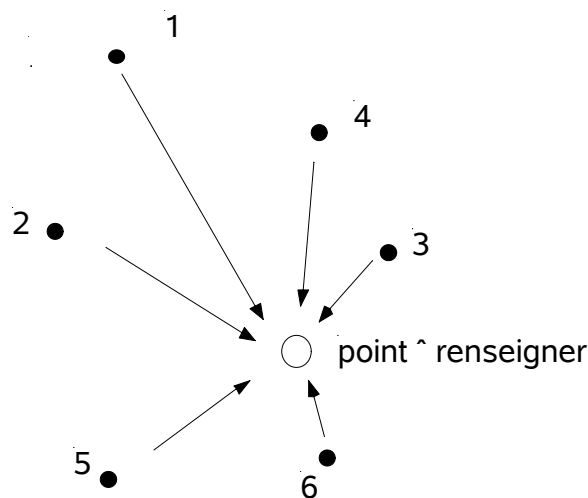
Ainsi, une densité d'arbre ou une proportion de résineux ne peuvent pas être mesurées objectivement et de façon univoque en un *point* de l'espace car elles impliquent nécessairement le recours à un *maillage* ou, plus généralement, une fonction de *voisinage*.

On voit donc que si l'on veut établir une cartographie continue de la distribution des facteurs susceptibles d'accroître ou de réduire les dommages subis par les forêts lors d'une tempête, il faut discuter de façon très précise les hypothèses sur les *voisinages*, c'est-à-dire les facteurs susceptibles d'exercer une action à distance, directe ou indirecte sur un lieu donné. On peut alors remplacer le concept habituel de *population* (quantité d'objets situés à l'intérieur d'une maille) par le concept de *potentiel* (quantité d'objets situés au voisinage d'un point de l'espace).

Dans le cadre d'une approche classique en terme de population, on assimile chaque individu observé à la population localisée sur la surface à laquelle il appartient. Autrement dit, on raisonne comme si les facteurs déterminants les dommages subis par un arbre étaient liés aux attributs globaux de la parcelle à laquelle cet arbre appartient, même si cet arbre est situé en périphérie de cette parcelle.

Dans le cadre d'une approche en termes de potentiels, on construit une mesure de voisinage spécifique en tous points de l'espace : on raisonne comme si chaque arbre était soumis à des facteurs différents des autres puisque liés à sa situation spatiale spécifique. Si la fonction de voisinage est continue et décroissante avec la distance, on considérera que deux arbres proches sont soumis à des risques de dommages très voisins.

Figure 1 : Contribution totale de points à un calcul de potentiel



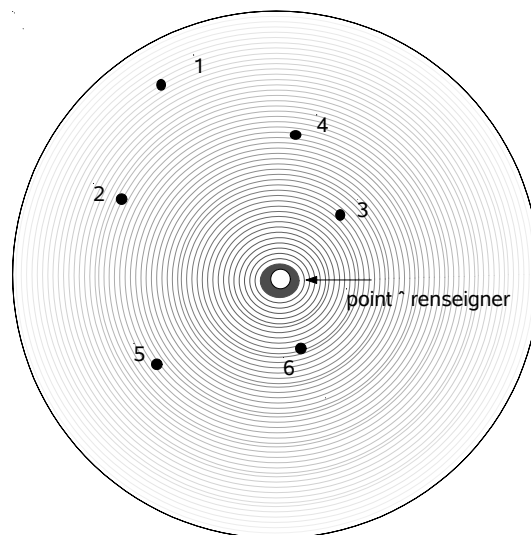
Si l'on considère que toutes les observations « dans le proche environnement » ont la même aptitude à influencer la potentialité d'un point quelconque, la figure 1 résume bien le calcul de ce potentiel : le potentiel est le simple cumul des valeurs des points dits proches (fonction rectangulaire d'environnement spatial).

Par contre, si l'on considère, comme pour des phénomènes hydriques, que la relation amont-aval n'est pas linéaire, alors, il faut porter la réflexion vers une pondération de cette « puissance » en fonction de la distance, de la forme plausible de la forme de la fonction de la distance... Par exemple, un vaste espace dégagé au sein d'un peuplement a-t-il la même influence sur ce peuplement qu'un espace similaire rencontré par le vent plusieurs centaines de mètres avant la zone touchée par la tempête ?

Ceci reviendrait à penser, selon l'espacement des objets, à « une probable interaction » entre eux : quelle est la probabilité qu'un point distant d'un autre ait une influence sur ce dernier ? Cette probabilité doit permettre de relativiser la valeur « distante », de pondérer le potentiel à distance et autour du point à renseigner.

Pour tout point de l'espace, représentant l'ensemble des mailles régulières que nous construisons, nous allons déterminer la probabilité de relation entre chaque lieu connu (observé) et ce point. Cette fonction d'interaction spatiale est relative à la distance entre les points, au type de distance (euclidienne...), la forme de la fonction choisie... (nous avons supposé ici que l'influence d'un point s'érode avec la distance). Donc l'intensité de la relation (exprimée par la fonction d'interaction) diminue quand la distance au point à renseigner augmente (figure 2).

Figure 2 : Influence décroissante avec la distance



Ainsi, estime-t-on une nouvelle valeur, affectée au point à renseigner, qui soit une prise en compte des n valeurs connues et pondérées par fonction de voisinage décroissante avec la distance.

On obtient à partir de notre maillage régulier et homogène, des cellules renseignées par une quantité potentielle du phénomène observé. La mise en relation des phénomènes va pouvoir s'effectuer à différentes échelles, avec une représentation homogène : cette transformation permettra de rendre comparables des variables qui *a priori* ne l'étaient pas et ensuite de les analyser.

3.1 Explicitation de la méthode « classique »

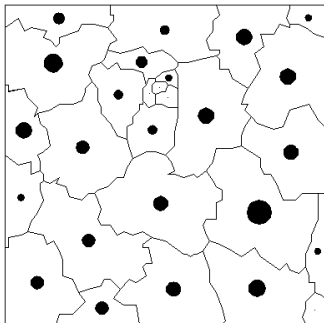
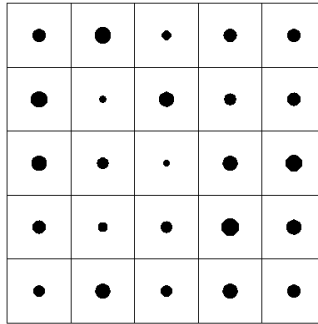
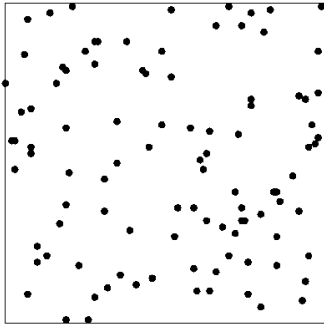
→ Filtrage des bruits

La première application de la méthode proposée par Grasland, Mathian & Vincent (2000) consiste à reconstituer une carte de densité à partir d'une information plus ou moins dégradée sur le semis spatial des individus servant de base au calcul de la densité. On voit immédiatement que l'exemple théorique proposé (figure 3) est directement transposable au cas des données forestières qui peuvent effectivement être collectées soit au niveau élémentaire (arbre par arbre), soit au niveau d'un maillage homogène (parcellaire régulier, plan de sondage, données de télédétection), soit au niveau d'un maillage irrégulier (parcellaire foncier, découpage administratif...). Sachant que les trois distributions de la figure 3 décrivent en réalité la même distribution spatiale (plus ou moins dégradée), on peut se demander s'il est possible d'obtenir des cartes de densité approximativement identique en utilisant une méthode adaptée de filtrage.

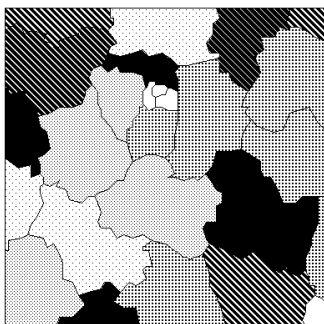
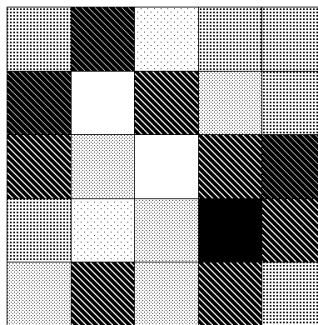
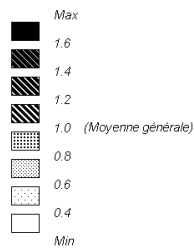
Figure 3 : Élimination des biais d'observation liés au maillage de collecte

(Source : Grasland, Vincent, Mathian 2000)

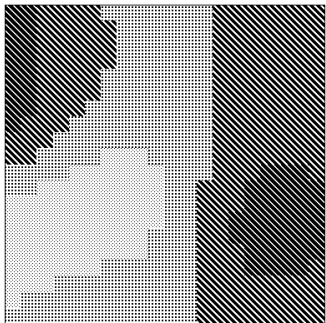
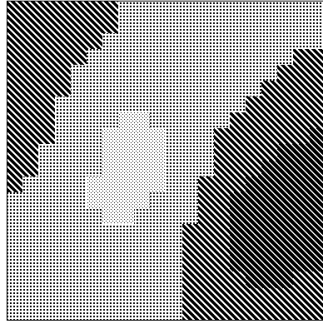
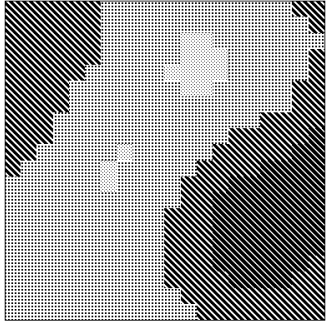
Une information ponctuelle plus ou moins dégradée...



... conduit à une instabilité des cartes de densité...



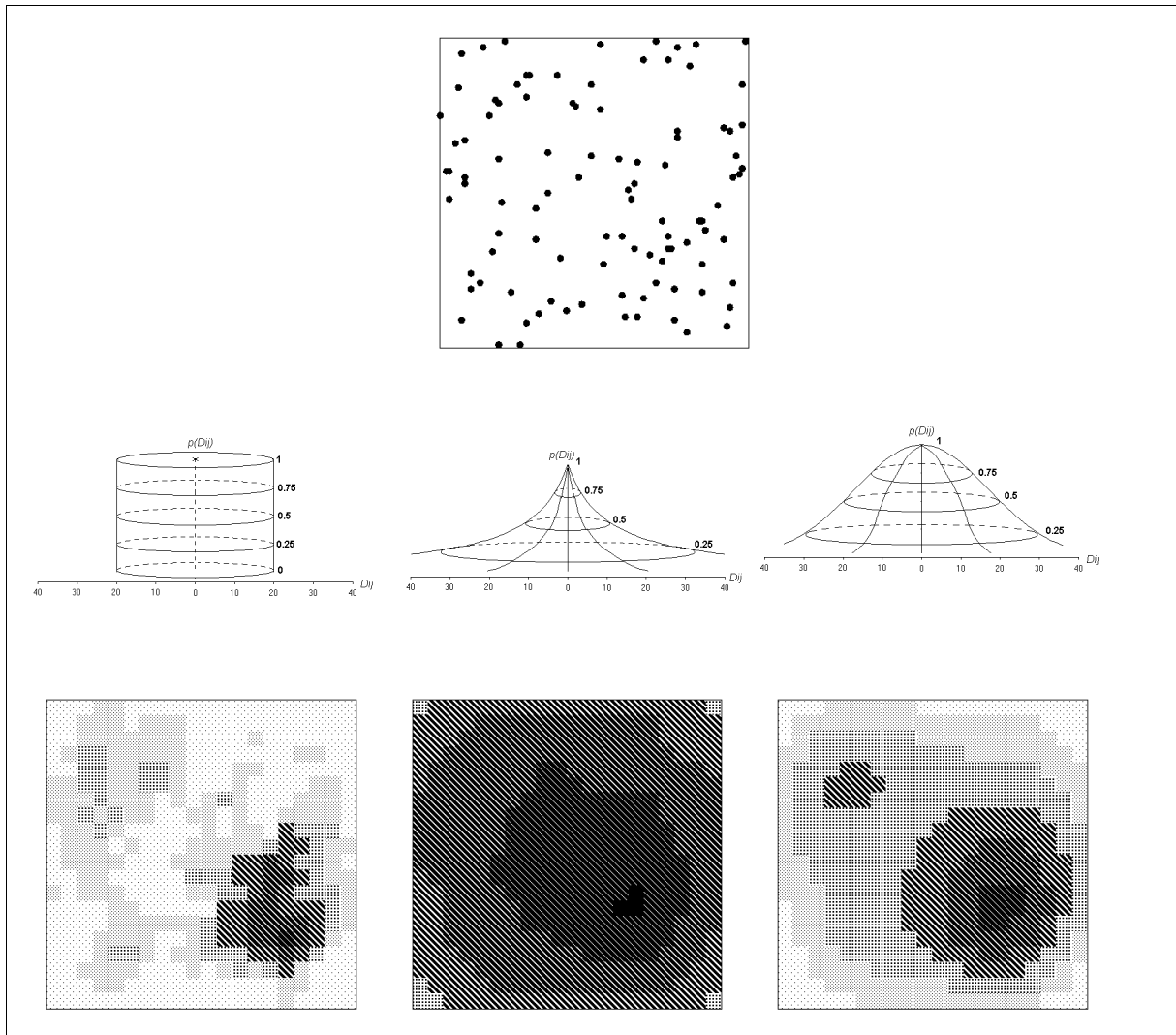
... que l'on peut réduire en utilisant une méthode de lissage fondée sur les potentiels de population et de surface dans un voisinage gaussien



→ Calcul des stocks localisés dans des voisinages de portées variables

La différence fondamentale entre la méthode de lissage proposée par Grasland & al. (2000) et les autres méthodes d'interpolation utilisées en géostatistique vient du fait que ce ne sont pas les taux (Z) qui sont lissés mais les stocks ($P_1 \dots P_n$) servant de base au calcul de ces taux. Ainsi, lorsque l'on veut calculer une densité D de population lissée dans un certain voisinage v , on calcule successivement les quantités de population et de surface dans ce voisinage et ce n'est qu'*in fine* que l'on obtient la densité de voisinage $D(v)$ définie comme le rapport entre la population du voisinage $P(v)$ et la surface du voisinage $S(v)$.

Figure 4 : Population localisée au voisinage d'un point, sous différentes hypothèses de voisinage isotropes

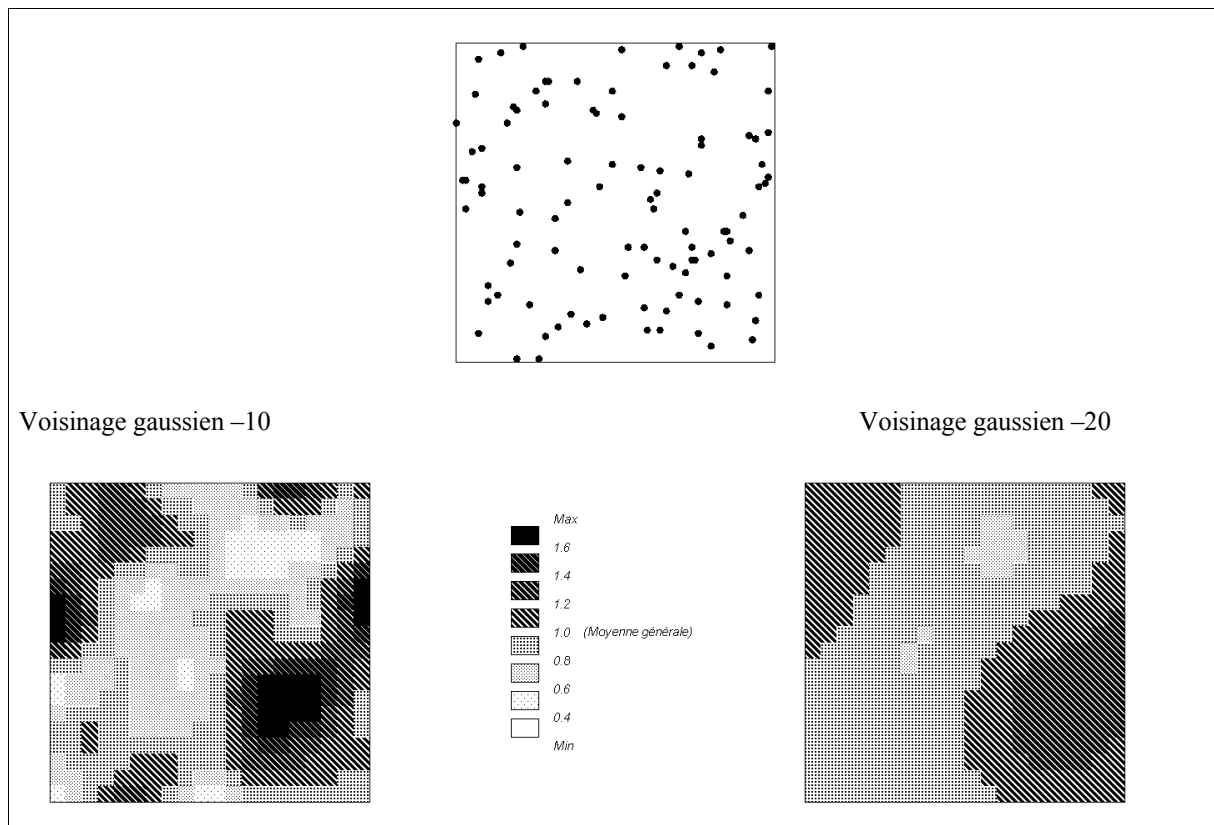


3.2 Analyse de l'homogénéité d'une distribution à l'aide de voisinages de portées variables

Que l'on raisonne sur des stocks ou sur des taux, la prise en compte de voisinages de portées différentes permet d'introduire des hypothèses explicites sur le rôle de facteurs se déployant sur des portées différentes. Ainsi, dans le cas d'un semis d'arbre, on peut émettre l'hypothèse que les risques face à la tempête dépendent de plusieurs échelles de densités. Une parcelle forestière isolée en plaine correspond au cas où la densité « locale » (échelle de la parcelle) est très supérieure à la densité « régionale » (échelle de la parcelle et de ses alentours). Une clairière correspond inversement au cas où la densité « locale » est très inférieure à la densité « régionale ». Une parcelle localisée au cœur d'un massif forestier homogène correspond enfin au cas où les deux densités « locale » et « régionale » sont à peu près identiques.

On voit clairement tout le parti que l'on peut tirer d'une combinaison d'indicateurs se déployant sur des portées variables dans tous les domaines de la géographie.

Figure 5 : Calcul de la densité dans deux voisinages de portées différentes

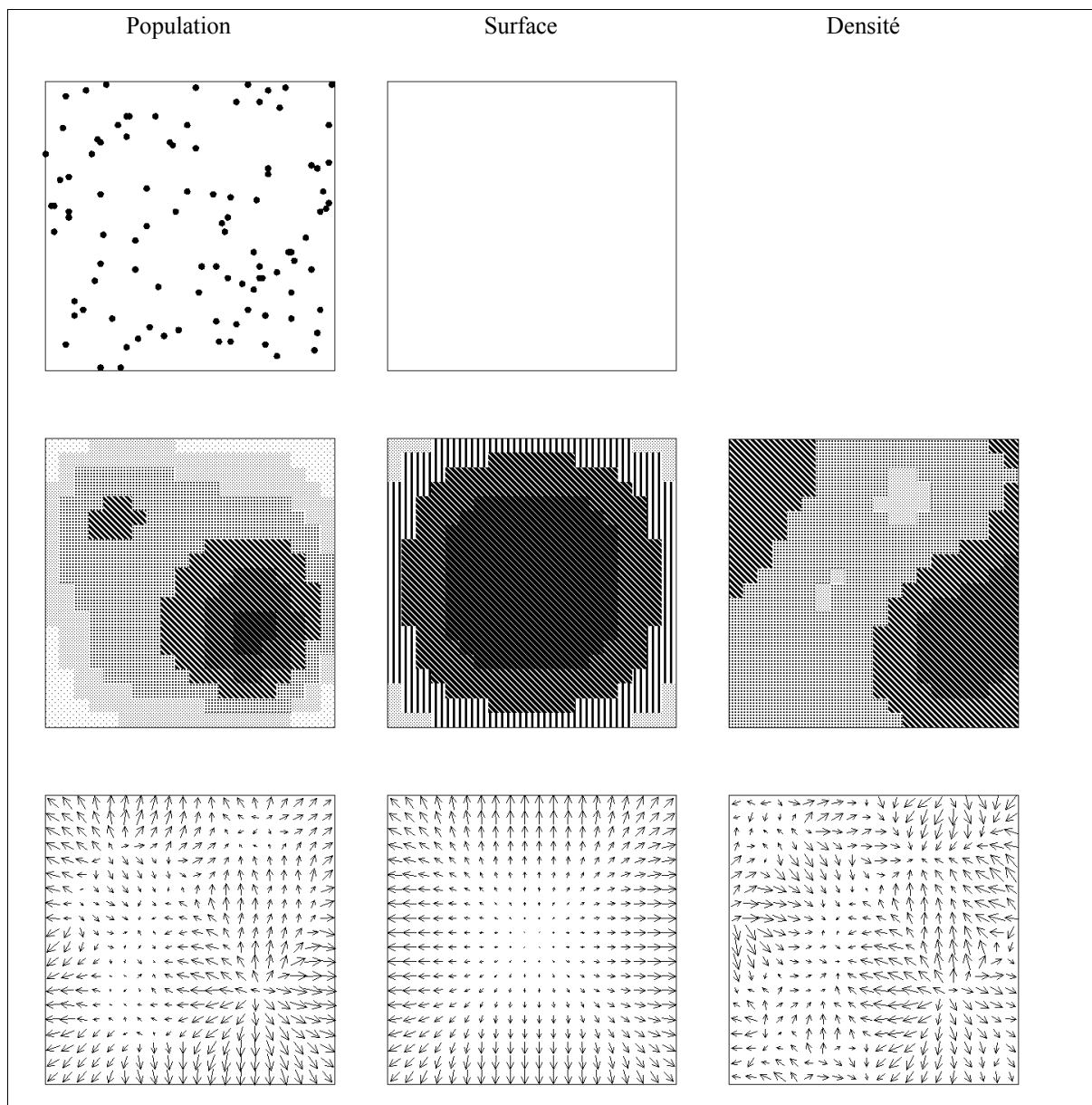


3.3 Prise en compte de l'anisotropie à l'aide de résultantes vectorielles ou de voisinages orientés

Les applications précédentes se fondaient sur une lecture isotrope de l'espace où l'on considère que l'influence exercée sur un point par divers facteurs ne dépend que de leur distance à ce point et aucunement de leur orientation angulaire. Or, il est bien évident que la même quantité de population ou d'arbres située dans le voisinage d'un point aura des effets différents selon que ces arbres sont répartis de façon homogène, alignés, concentrés dans une direction privilégiée de l'espace.

On peut donc associer à la somme arithmétique des stocks situés dans le voisinage d'un point (potentiel scalaire) une somme vectorielle qui indique la direction principale d'origine des contributions (vecteur potentiel). On en déduit la direction des gradients d'un rapport en soustrayant le vecteur potentiel du numérateur et celui du dénominateur.

Figure 6 : Exemple de calcul des vecteurs potentiels de deux stocks du taux associé



4. Un développement de la méthode des potentiels : l'utilisation de voisinages anisotropes fondés sur les secteurs angulaires

Cherchant à s'affranchir des problèmes des divers maillages de la gestion forestière, nous avons opté pour une solution de calculs de potentiels utilisant des voisinages de portées variables. Mais cette méthode présente aussi un autre intérêt.

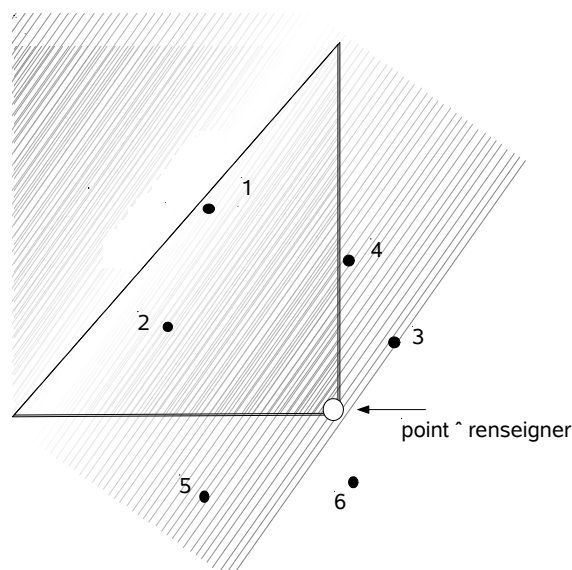
En effet, si l'on considère le phénomène observé non plus comme une mesure (ou observation) en un lieu mais comme une énergie potentielle autour de ce lieu, la mise en relation avec le facteur principal des dégâts des tempêtes - le vent - peut prendre un tout autre sens : les vents qui ont fait subir des dommages aux forêts ont rencontrés ces « potentiels ». Ces rencontres, ces co-occurrences spatiales, ne sont pas donc pas anodines. La question devient dès lors : quels sont les potentiels de facteurs rencontrés par le vent lors de son passage dans telle ou telle zone ? Quelle « énergie » ces facteurs ont-ils fourni face au vent ? Résistance au vent, ou perturbation et amplification de la circulation du flux d'air à travers les peuplements forestiers ? Autrement formulée, la question revient à se demander, au-delà des facteurs locaux souvent insuffisants, si les interactions spatiales ainsi formulées ne seraient pas un facteur déterminant dans la nature des dégâts... Ceci fait également penser aux relations amont-aval que l'on rencontre dans les problèmes d'érosion hydrique des sols... Gardons aussi à l'esprit la notion de source qui représente une image très parlante.

Adaptation de la méthode

Dans la méthode générale décrite dans (Grasland, Mathian & Vincent, 2000), le calcul des potentiels utilise des fonctions de voisinages fondées sur la distance euclidienne au point d'observation, ce qui revient à prendre en compte un espace isotrope. Mais il est tout à fait possible d'adapter la méthode et de calculer des potentiels qui soient fonctions à la fois de la distance et de l'orientation angulaire, si l'on rejette l'hypothèse d'isotropie de l'espace. C. Grasland (2001) montre ainsi comment les contributions au potentiel de population d'Avignon ont des orientations angulaires très différentes selon la portée spatiale considérée. Ces modifications concernent non seulement la direction principale, mais aussi le nombre de directions privilégiées. Avignon apparaît tour à tour comme un pôle (courte portée), comme un axe (moyenne portée) et comme un carrefour (longue portée).

Si l'on transpose cette analyse au cas de la protection offerte à un arbre par un voisinage forestier d'un certain type, on voit immédiatement que ce qui compte n'est pas simplement la quantité localisée dans un voisinage isotrope (*e.g.* nombre de feuillus dans un rayon de 100 mètres) mais la quantité localisée dans un certain secteur angulaire de ce voisinage (*e.g.* les feuillus situés à moins de 100 mètres en amont du lieu par rapport à la direction locale du vent). Or, dans le cas présent, nous cherchons à mettre en évidence les relations entre informations géographiques forestières, occupation du sol, etc... et un flux d'air qui par définition est orienté. Ceci signifie que, pour un peuplement donné, ce flux a une origine, une source.

Figure 7 : prise en compte des secteurs de vent



Une première adaptation que nous faisons à la méthode générale consiste à prendre en compte l'origine de cette source de vent en la considérant constante sur l'espace étudié (Lallement, 2002) : après avoir défini un maillage régulier (représenté par les homogénéités j des mailles), pour tout point j sur lequel nous voulons calculer un potentiel, nous regardons quels sont les points i connus (points candidats) qui pourraient fournir de la matière au

potentiel de j , selon sa localisation par rapport à j : distance mais aussi orientation du trajet du vent. Un point connu n'est conservé que s'il se trouve dans le secteur angulaire retenu pour le semis de points à renseigner. Dans la figure 7, seuls les points connus 1 et 2 seront conservés dans le calcul des potentiels.

Cette première adaptation repose sur des hypothèses fortes :

- l'environnement du point à renseigner n'est pertinent que sur le trajet du vent, en considérant que les particules d'air qui viennent frapper le point à renseigner ont une trajectoire linéaire, dont la source nous est donnée par un ordre de grandeur ;
- le vent est considéré comme constant : le réseau de capteurs est très lacunaire et les informations données par les stations périphériques au massif forestier montrent une assez bonne constance du flux (orientation et force) pendant la nuit des dégâts.
- les perturbations locales du flux ne sont pas prises en considération.

5. Quelques exemples d'application

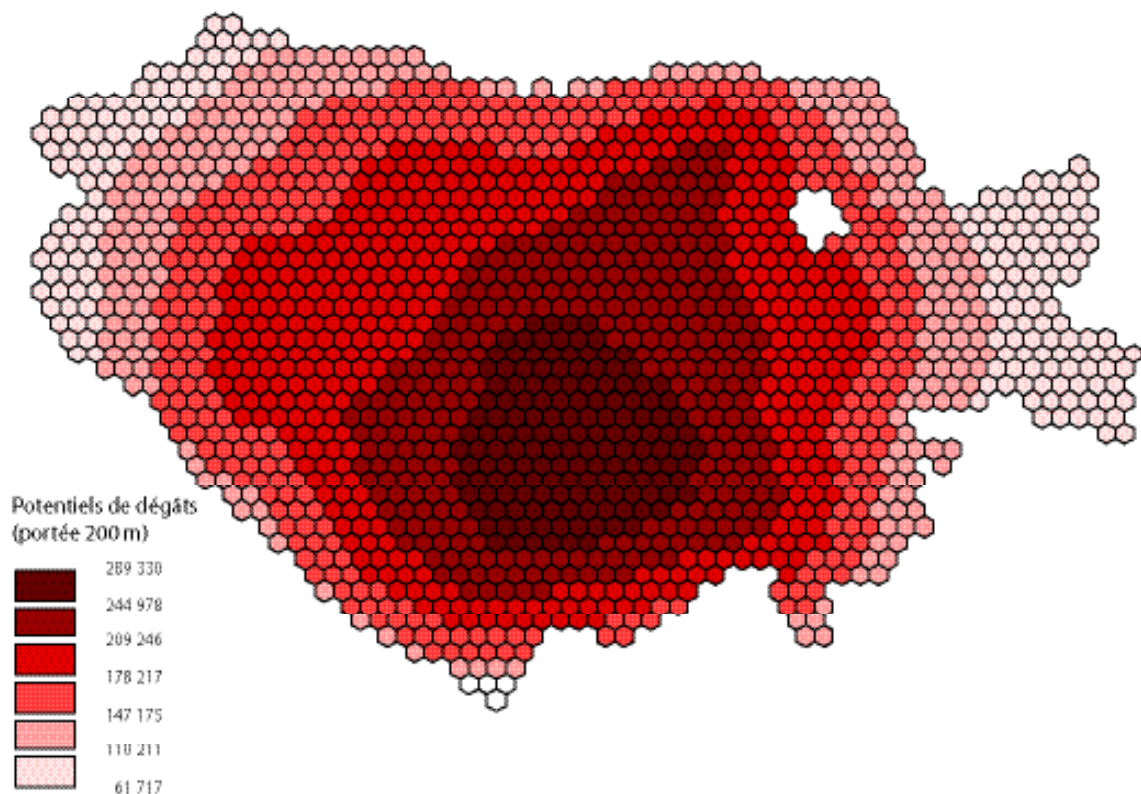
L'ensemble des traitements à effectuer représente un enchaînement d'hypothèses qui vont préciser les paramètres des calculs de potentiels :

- résolution du maillage régulier à exploiter ;
- portée ;
- seuillage des distances ;
- sectorisation des calculs ;
- type de fonction.

Les quelques exemples que nous présentons ci-après reposent sur un jeu de données assez simple, exprimé par les variables décrivant chaque cellule de notre maillage hexagonal (pas de 100 mètres) :

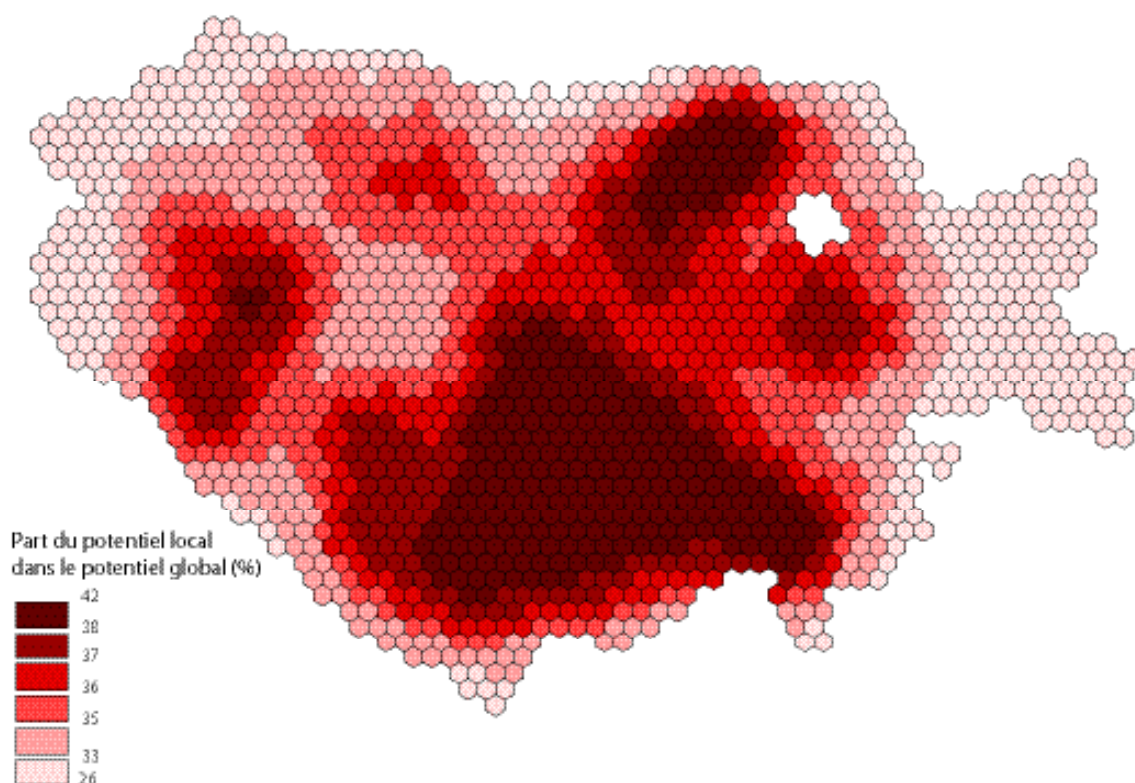
- « equiv » : dégâts exprimés en superficie (équivalente à un dégât total de 100 %), (d'après le dossier « assurance », cartographie au 1/5 000) ;
- « lroutes » : longueur cumulée de voies (chemins, routes...) ;
- « tsf », « fr », « ff » : surfaces de taillis-sous-futaie, futaie résineuse, futaie feuillue ;
- « car12 » : distance cumulée des 12 carrefours les plus proches (d'après fond IGN 1/25 000).

Carte 1 : Potentiels de dégâts (m2), Le Huttier (Eure, France)



Pour illustrer notre propos, nous avons élaboré ce jeu de données sur une base hexagonale régulière, au pas de 100 mètres (distance entre les centres des polygones). La fonction d'environnement spatial est ici celle dite de Pareto. La carte 1 représente les potentiels de dégâts, avec une portée de 200 mètres (la portée exprimant la distance à partir de laquelle la probabilité de relation spatiale est inférieure à 0,5). À travers cette simple carte, une certaine idée de l'organisation spatiale des dégâts apparaît. Il est aussi très intéressant de comparer des potentiels sur deux niveaux : l'exemple ci-dessous (carte 2), nous montre la proportion que représente un potentiel local (portée 200 mètres) par rapport à un potentiel plus global (500 mètres).

Carte 2 : Part d'un potentiel local dans un potentiel plus global, Le Huttier



Outre une représentation de résultats bruts, il est également important de construire des informations de potentiels pour comprendre les événements de décembre 1999. Ainsi, sous l'hypothèse du rôle du type de peuplement et des voies de communication au sein du massif, nous regardons les corrélations des potentiels (avec une portée de 500 mètres) (tableau 1). Bien évidemment, premier biais dans notre raisonnement, avec une telle portée, le lissage est très important et les corrélations très fortes (peu de différences de potentiels à chaque point).

Tableau 1 : Corrélation de divers potentiels indicateurs, portée de 500 mètres

	P_LRoutes 500	P_CAR12 500	P_EQUIV 500	P_TSF 500	P_FF 500	P_FR 500
P_LRoutes_500	1.00	0.70	0.88	0.88	0.86	0.69
P_CAR12_500	0.70	1.00	0.67	0.57	0.48	0.75
P_EQUIV_500	0.88	0.67	1.00	0.65	0.63	0.88
P_TSF_500	0.88	0.57	0.65	1.00	0.73	0.33
P_FF_500	0.86	0.48	0.63	0.73	1.00	0.45
P_FR_500	0.69	0.75	0.88	0.33	0.45	1.00

A un niveau plus local (portée 200 mètres), si on étudie certaines corrélations, on constate des changements importants dans les relations statistiques (notamment dans la relation que l'on suppose forte, entre dégâts et proximité de carrefours) (tableau 2).

Tableau 2 : Corrélations, portée de 200 mètres

	<i>P EQUIV200</i>	<i>P FR 200</i>	<i>PCAR12-200</i>
P_EQUIV200	1.00	0.86	0.38
P_FR_200	0.86	1.00	0.48
PCAR12-200	0.38	0.48	1.00

En fait, il y a deux biais dans cette approche : tous les individus connus sont pris en compte, quelque que soit la distance qui les sépare des points à renseigner et quelque que soit leur localisation vis-à-vis de ce même point.

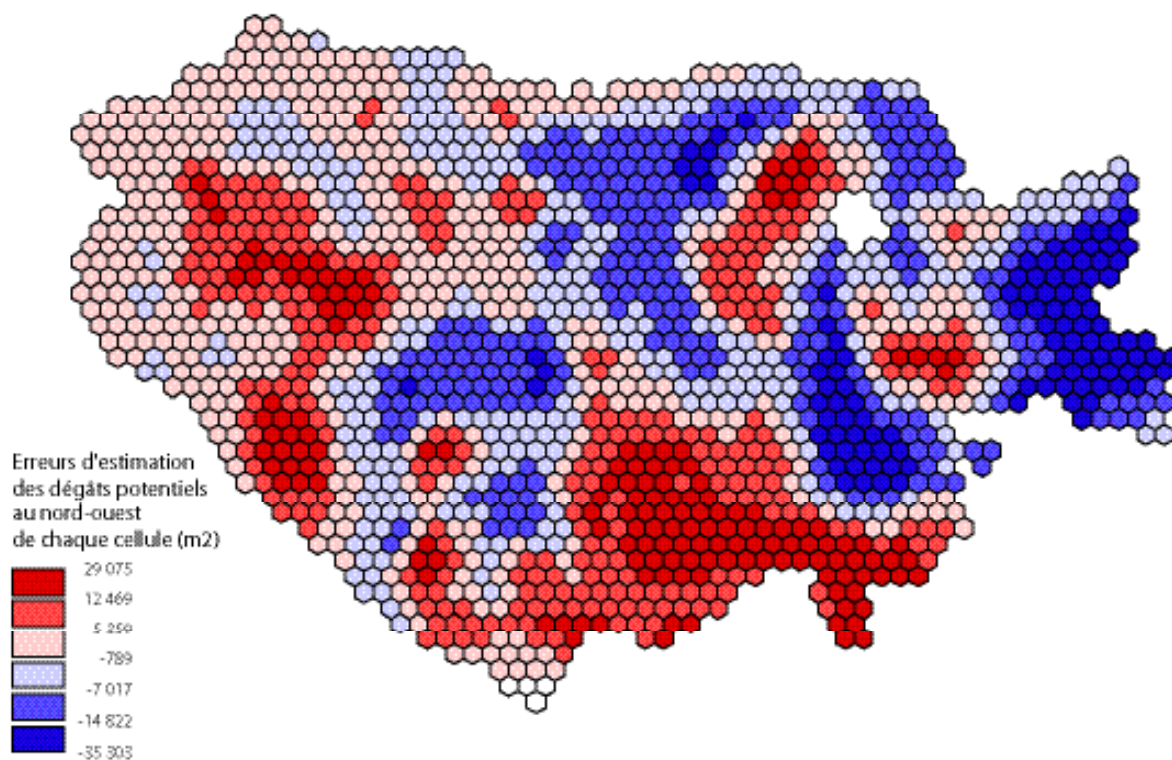
Dès lors que nous ne prenons en considération que les informations des points situés au nord-ouest du point candidat, pour lequel nous étudions aussi le potentiel de dégâts au nord-ouest, les corrélations sont beaucoup plus fortes (tableau 3). C'est par exemple le cas dans l'étude des potentiels de dégâts situés au nord-ouest de tout point de notre semis.

Tableau 3 : Corrélation des potentiels prenant en compte l'orientation des trajets

	<i>P EQUIV 200NW</i>	<i>P LRoutes200NW</i>	<i>P CAR12 200NW</i>	<i>P FR 200NW</i>
P_EQUIV_200NW	1.00	0.89	0.75	0.91
P_LRoutes200NW	0.89	1.00	0.80	0.80
P_CAR12_200NW	0.75	0.80	1.00	0.73
P_FR_200NW	0.91	0.80	0.73	1.00

Avec de tels résultats, nous sommes tentés de modéliser ces potentiels de dégâts « au nord-ouest » par régression multiple utilisant ces variables de potentiels (ce qui nous donne un coefficient de détermination de 0,89 !); en prenant bien soin d'observer (par exemple) la relation statistique qui lie le potentiel de routes et le potentiel de futaie résineuse... La cartographie des résidus nous permet ensuite de relancer la réflexion sur les indicateurs à créer ou à appliquer (carte 3).

Carte 3 : Erreurs d'estimation par régression multiple des dégâts potentiels au nord-ouest de tout point, Le Huttier



Conclusion

La présentation de nos recherches a été, dans le cadre de cet article, essentiellement méthodologique. Face à des résultats plutôt encourageants, une prochaine étape de travail consistera à développer la partie thématique, qui passe par l'analyse approfondie des potentiels (analyse multivariée, analyse d'hétérogénéité...). Cette phase nécessitera aussi un travail important de construction de nouveaux indicateurs :

- indices de pénétrabilité : à partir de l'imagerie numérique horizontale, construction des coefficients de pénétrabilité du vent dans les peuplements forestiers ;
- différentiels de hauteur de mur : pour prendre en compte l'effet venturi, construction d'une information à partir du différentiel de hauteur des marges des peuplements (notamment le long des chemins) ;
- potentiel de volume au-dessus du sol : à partir des hauteurs des peuplement et d'un modèle numérique de terrain (pour les massifs en relief plus marqué) ;
- prise en compte de perturbations locales (à partir de mesures de vitesses verticales du vent, de modèle de propagation).

Par ailleurs, des prolongements thématiques vont voir le jour (étude de l'érosion hydrique des sols, risques d'inondation...). En particulier, nous travaillons parallèlement à un programme d'étude sur la pollution atmosphérique : sous hypothèse de vent dominant, et grâce à la connaissance de l'occupation du sol, nous pourrions estimer le risque pour une pollution de fond, comme pour un aléa technologique (la fonction d'interaction spatiale devenant alors cousine de celles de la circulation et de la dilution des polluants). Quel serait le potentiel du « dommage » sous hypothèse d'un accident lors d'un épisode venteux de nord-ouest ?

Pollution ou risques hydriques, cette extension thématique nous invite déjà à nous pencher sur la dimension dynamique des potentiels...

BIBLIOGRAPHIE

- BOULIER J. (1995) *Méthodologie et construction d'une base de données géographiques forestières, application à l'Inventaire Forestier National*, Thèse de doctorat en Géographie, Rouen, 425 p.
- BOULIER J. (1998), Vers une nouvelle cartographie des formations forestières, *Mappemonde*, n°49, Belin Reclus, Montpellier
- BOURSIER-MOUGENOT I., CATTAN N., GRASLAND C., ROZENBLAT C. (1993), Images de potentiels de population en Europe, *L'Espace géographique*, 4, pp. 333-345
- GRASLAND C. (1991), Potentiel de population, interaction spatiale et frontière: des deux Allemagne à l'unification, *L'Espace Géographique*, 3, pp. 243-254
- GRASLAND C. (1998), La composante d'échelle dans l'analyse des distributions spatiales. Application à la fécondité européenne en 1980 et 1988, *Revue Belge de Géographie*, 122^{ème} année, fasc. 4, pp. 435-457
- GRASLAND C., MATHIAN H., VINCENT J.-M. (2000), Multiscalar Analysis and map generalisation of discrete social phenomena : Statistical problems and political consequences, *Statistical Journal of the United Nations ECE*, 17, pp. 157-188
- GRASLAND C. (2001), Lissage cartographique et animation spatio-temporelle : quelques réflexions méthodologiques, *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 12 p.
- LALLEMENT B. (2002), *Vers un apport de l'analyse spatiale dans la compréhension des dégâts forestiers causés par la tempête de 1999*, Mémoire de maîtrise de géographie, (dir. J. Boulier), Université de Paris1.