

ENGREF - Modèles aléatoires, simulation, prévision et contrôle.
Projet - 28&29/01/2003

Structure spatiale des tempêtes en forêt de Fontainebleau

version du 10/1/03

Tuteur : François Goreaud
Cemagref, Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes complexes
Tél : 04.73.44.06.80
Email : francois.goreaud@clermont.cemagref.fr

Présentation du sujet :

Les tempêtes entraînent régulièrement des dégâts en forêt et sont un facteur important de la mortalité naturelle. En éliminant certains arbres, elles contribuent à modifier la structure spatiale du peuplement, c'est à dire la position relative des arbres les uns par rapport aux autres, par exemple en ouvrant des clairières. Or, cette structure spatiale du peuplement influence fortement la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes forestiers, en particulier en terme de régénération, mais aussi en terme de compétition.

La réserve intégrale de la Tillaie offre un cadre d'application privilégié, car sa dynamique, non perturbée de puis longtemps par les actions humaines, est proche de la dynamique naturelle.

Pour mieux comprendre l'effet des tempêtes sur la structure spatiale des peuplements, nous vous proposons dans ce projet d'étudier la structure spatiale des arbres morts lors de deux tempêtes (1967 et 1990) dans la réserve intégrale de la Tillaie, puis éventuellement de construire un modèle correspondant à cette structure pour simuler cette mortalité et étudier son impact sur la dynamique de l'écosystème forestier.

Nous disposons pour cette étude des relevés cartographiques de la position des arbres morts dans la réserve de la Tillaie lors de ces deux tempêtes (Pontailler et al., 1997), ainsi que de la cartographie des arbres vivants sur une placette d'1ha (Zobi, 1997).

Pour l'analyse spatiale, vous pourrez utiliser plusieurs outils statistiques, notamment la fonction de Ripley $K(r)$ et la fonction associée $L(r)$, qui caractérisent la structure d'un semis de points à plusieurs échelles, et la fonction intertype $L_{12}(r)$, qui caractérise la structure relative de deux semis de points. Ces fonctions pourront être calculées à l'aide du logiciel ADS (Analyse des Données Spatiales) disponible gratuitement sur internet.

Pour la modélisation, vous pourrez utiliser le formalisme des processus ponctuels, et faire des simulations d'évolution de peuplements avec le logiciel CAPSIS.

Mots clés : Structure spatiale, dynamique forestière, tempête.

1. Prise de contact avec les données

Avant de commencer l'analyse de la structure spatiale proprement dite, nous vous proposons de vous familiariser avec le matériel d'étude : la réserve de la Tillaie.

11. La réserve intégrale de la Tillaie

La réserve intégrale de la Tillaie, fleuron des réserves biologiques en France, a fait l'objet de nombreuses études. Nous vous proposons d'en découvrir un peu plus à son sujet :

- en lisant la description détaillée fournie en annexe de ce document
- en lisant l'article Pontailier et al. (1997) qui vous sera fourni au début de ce projet
- sur le site internet de l'ONF (par exemple : <http://www.onf.fr/fontainebleau/reserve.htm>).

Ces différents documents devraient vous permettre d'identifier plusieurs questions scientifiques et de gestion auxquelles l'étude du dispositif de la Tillaie peut apporter des éléments de réponse.

12. Les tempêtes de 1967 et 1990.

Le Fichier XL "tillaie6790_030110.xls" contient la liste des arbres qui sont tombés lors des tempêtes de 1967 et 1990, avec leur position.

12a) : Ouvrez ce fichier, et familiarisez vous avec le format des données :

- colonne 1 : n° de l'arbre
- colonne 2 : "arbre mort"
- colonne 3 : précise s'il s'agit d'un chablis ou d'un volis, et pour quelle tempête
- colonne 4 : coordonnée x de l'arbre
- colonne 5 : coordonnée y de l'arbre

12b) : Représentez, à l'aide des graphes XL, la carte des positions des arbres lors de la tempête de 1967, puis la carte de la tempête de 1990, en distinguant les chablis des volis.

- A l'oeil, que pouvez vous dire de la structure spatiale des dégâts de tempête ?
- Que pensez vous de la notion d'ouverture de clairière développée dans Pontailier et al. (1997) ?
- Les dégâts de tempête de 1990 vous semblent-ils influencés par ceux de 1967 ? Comment ?

12c) Vous pouvez constater que les limites de la réserve ne sont pas rectangulaires. Dans un premier temps, pour cette analyse de la structure spatiale, vous allez vous limiter à une sous-placette rectangulaire.

- Définissez les bornes en x et y de cette placette rectangulaire de façon à conserver le plus de données possibles.
- Construisez ensuite deux fichiers "tillaie67.xls" et "tillaie90.xls" en ne conservant que les arbres morts en 1967 (resp. 1990) qui sont inclus dans cette sous-placette rectangulaire.
- Faites également les cartes correspondant à ces deux fichiers.

14. La placette cartographiée en 1997

Pour mieux interpréter les résultats de l'analyse de la structure spatiale des dégâts de tempête dans la réserve de la Tillaie, nous aurons également besoin d'informations sur la structure spatiale du peuplement forestier vivant.

Le fichier "tillaie97_030110.xls" contient la liste des arbres vivants, cartographiés en 1997 sur une petite placette rectangulaire de la réserve.

13a) : Ouvrez ce fichier, et familiarisez vous avec le format des données :

- colonne 1 : n° de l'arbre
- colonne 2 : espèce
- colonne 3 : coordonnée x de l'arbre
- colonne 4 : coordonnée y de l'arbre
- colonne 5 : circonférence de l'arbre
- colonne 6 : état sanitaire de l'arbre

13b) : Représentez, à l'aide des graphes XL, la carte des positions des arbres vivants en 1997, en distinguant les différentes espèces.

- A l'oeil, que pouvez vous dire de la structure spatiale du peuplement ?
- D'après vous, comment la structure spatiale des arbres vivants peut-elle jouer sur la structure spatiale des dégâts de tempête ?

2. Premier calcul d'analyse de la structure spatiale

21. Arbres morts en 1967

Dans un premier temps, nous souhaitons caractériser la structure spatiale des arbres morts en 1967, pour des échelles variant de 1 à 200m. Pour cela, nous vous proposons de calculer la fonction de Ripley $L(r)$, sur la parcelle rectangulaire que vous avez défini au paragraphe 12c.

21a) : Pour effectuer ce calcul avec le logiciel ADS, reprenez le guide du TP, et la notice du module "Ripley". Les principales étapes sont les suivantes :

- La création d'un fichier texte "til67.txt" (2 colonnes, x et y)
- La conversion en fichier binaire "til67" à l'aide du module TextToBin
- La création d'un fichier texte "rect.txt" correspondant aux limites de la placette
- La conversion en fichier binaire "rect"
- Le calcul de la fonction $L(r)$ proprement dite avec le module Ripley (options Initialize puis Ripley)
- La récupération des résultats du calcul (fichiers binaires) sous XL via BinToText
- La représentation des résultats par le module Curves ou XL.

21b) : Interprétez les résultats obtenus :

- Quelle est la structure spatiale des arbres morts en 1967 ?
- Quelles sont les échelles principales du phénomène observé ?
- A quoi cette structure peut elle correspondre ?

22. Arbres morts en 1990

Reprenez la même procédure pour étudier la structure des arbres morts en 1990.

Comparez les deux résultats : en quoi la tempête de 1990 diffère-t-elle de celle de 1967 ?

3. Plusieurs propositions pour la suite du projet.

Plusieurs pistes peuvent être explorées pour aller plus loin dans la compréhension de la structure spatiale des dégâts de tempête en forêt de Fontainebleau. Dans le cadre de ce projet, nous vous proposons de choisir les pistes qui vous intéressent le plus, et de construire avec nous la stratégie qui vous semblera la plus adaptée.

31. Analyser l'ensemble de la réserve, de forme polygonale, pour prendre en compte toutes les données disponibles.

Pour l'instant, pour simplifier les calculs, vous avez étudié une sous-placette rectangulaire de la réserve de la Tillaie. Vous n'avez donc utilisé qu'une partie des données.

Il est possible d'utiliser toutes les données disponibles, et donc a priori d'obtenir des résultats plus précis, en définissant une zone rectangulaire plus grande dont on exclut des triangles. (voir la notice du module Ripley).

32. Etudier la structure spatiale du peuplement vivant pour mieux interpréter la structure spatiale des arbres morts.

A partir des données de cartographie du peuplement vivant en 1997, vous pouvez caractériser la structure spatiale du peuplement, en distinguant éventuellement les différentes espèces. Il suffit pour cela de suivre la même procédure qu'en 21.

33. Etudier les dépendances entre les arbres morts en 1967 et les arbres morts en 1990.

Il est possible d'étudier la position relative des arbres morts en 1967 et en 1990, en utilisant la fonction intertype $L_{12}(r)$ très proche de la fonction de Ripley. Elle vous renseignera sur l'influence que la première tempête a pu avoir sur la seconde. Pour plus de détails, voir la notice du module "intertype" d'ADS.

34. Etudier la différence entre les volis et les chablis

Pour étudier plus finement les différents types de mortalité, vous pouvez séparer les arbres morts par chablis et les arbres morts par volis, et entreprendre une étude de la structure spatiale de chacun séparément, en utilisant la même procédure qu'en 21. Vous pouvez également calculer la fonction intertype entre volis et chablis (voir la notice du module "intertype" d'ADS).

35. Utiliser un autre outil d'analyse de la structure spatiale.

Il existe plusieurs outils pour étudier la structure spatiale d'un semis de point. Si la fonction de Ripley est très riche, parce qu'elle permet de caractériser la structure spatiale d'un semis de points à plusieurs distances en même temps, il existe aussi des indices plus simples, comme l'indice de Clark et Evans, basé sur la distance au plus proche voisin. Vous pouvez construire

un petit programme informatique pour effectuer ce calcul, et compléter ainsi vos conclusions sur les calculs de structure spatiale déjà effectués.

36. Construire un modèle de tempête

Les processus ponctuels sont des outils puissants pour modéliser les semis de point. Vous pouvez utiliser ce formalisme pour modéliser l'effet d'une tempête, par exemple en vous inspirant d'un processus de Neyman-Scott. Les résultats obtenus sur la Tillaie devraient permettre d'ajuster ou de valider ce modèle.

37. Etudier l'effet d'une tempête sur la dynamique et la structure d'un peuplement.

Grâce au logiciel de simulation de croissance de peuplements forestier CAPSIS, vous pouvez simuler l'effet d'une tempête sur l'évolution d'un peuplement. On peut en particulier étudier l'effet de la taille ou de la fréquence des ouvertures créées par les tempêtes sur la croissance et la régénération.

4. Références Bibliographiques

- Bouchon J., Faille A., Lemée G., Robin A.M., Schmitt A. - 1973** : Cartes et notices des sols, du peuplement forestier et des groupements végétaux de la réserve biologique de la Tillaie en forêt de Fontainebleau. Orsay. 12 p.
- Faille A., Lemée G., Pontailier J.Y. - 1984** : Dynamique des clairières d'une forêt inexploitée (réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau). I : Origine et état actuel des ouvertures. *Acta Oecologica, Oecologia Generalis*, 5 (1) : 35-51.
- Grand Mesnil H.N. - 1982** : A propos des réserves biologiques : questions d'histoire. *La voix de la forêt*, 1982/1 : 5-13.
- Guinier Ph. - 1950** : Foresterie et protection de la nature. L'exemple de Fontainebleau. *Revue Forestière Française*, II : 703-717.
- Lemée G. - 1966** : Sur l'intérêt écologique des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. *Bulletin de la société Botanique de France*, 113 (5-6) : 305-323.
- Lemée G. - 1987** : Les populations de chêne (*Quercus Petrea Liebl.*) des réserves biologiques de la Tillaie et du Gros Fouteau en forêt de Fontainebleau : structure, démographie, évolution. *La Terre et la Vie (revue écologie)*, 42 : 329-355.
- Lemée G. - 1990** : Les réserves biologiques de la Tillaie et du Gros Fouteau en forêt de Fontainebleau, écosystèmes climaciques. *Bulletin de la société Botanique de France, lettres botaniques* 1, 137 : 47-62.
- Pontailier J.Y., Faille A., Lemée G. - 1997** : Storms drive successional dynamics in natural forests : a case study in Fontainebleau forest (France). *Forest Ecology and Management*, 98 : 1-15.
- Van Baren B., Hilgen P. - 1984** : Structuur en Dynamiek in La Tillaie, een ongrstoord beukenbos in het bosgebied van Fontainebleau. Rapport du Rijkinstituut voor Natuurbeheer Leersum. 120 p.
- Vivien J. - 1984** : Les vieilles écorces de la Tillaie. *La voix de la forêt*, 1984/2 : 21-23.
- Zobi I.C. - 1997** : Analyse de la répartition spatiale des arbres dans la réserve biologique intégrale de la Tillaie (forêt de Fontainebleau). Rapport de stage, ENGREF. 26 p.

5. Annexe : description détaillée de la réserve de la Tillaie.

51. La réserve intégrale de la Tillaie est une portion de 25ha de la forêt de Fontainebleau qui depuis longtemps n'a subi que très peu d'interventions humaines.

La forêt de Fontainebleau est un vaste massif domanial de 20000 ha situé à 60 km au sud-est de Paris, et proche des villes nouvelles, ce qui lui vaut d'être gérée comme une forêt périurbaine. Elle est aussi considérée comme un patrimoine historique, culturel et écologique.

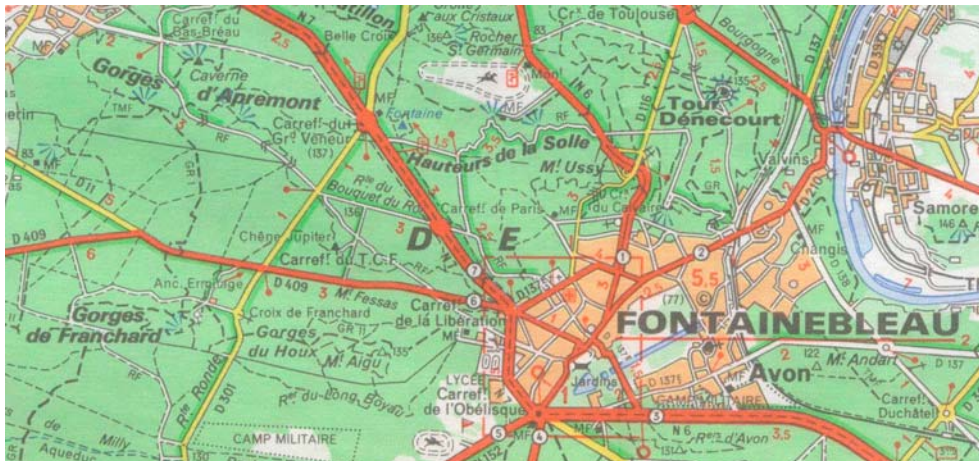


Figure 5.a : Position de la forêt domaniale de Fontainebleau.

La réserve intégrale de la Tillaie est une portion de 25 ha de la forêt située à 3km au Nord-Ouest de Fontainebleau (figure 5.b), sur un plateau d'altitude comprise entre 133 et 139m. Dans cette zone le sol est constitué d'un plateau calcaire recouvert par le "limon des plateaux" d'origine éolienne, dont l'épaisseur varie de 0.5m à 2 m. C'est un sol globalement pauvre, podzolisé par endroits. Le climat océanique est caractérisé par une température moyenne de 10.2°C et une pluviosité de 715 mm (Bouchon *et al.*, 1973; Pontailier *et al.*, 1997). La particularité de la réserve est qu'elle a subi très peu d'actions sylvicoles depuis au moins 400 ans (Guinier, 1950). En 1953 elle a été classée réserve naturelle intégrale, et depuis plus aucune éclaircie n'y est pratiquée. C'est donc un site presque unique¹ en France dans lequel la dynamique de la forêt s'approche d'une dynamique naturelle (Faille *et al.*, 1984; Lemée, 1990).



Figure 5.b : Carte de situation de la réserve intégrale de la Tillaie, carte IGN 1/25000 "forêt de Fontainebleau".

¹ Il existe seulement une deuxième réserve intégrale similaire, toujours en forêt de Fontainebleau : la réserve intégrale du Gros Fouteau.

Le peuplement de la réserve, à l'origine composé essentiellement de chênes et de hêtres, évolue maintenant vers un peuplement pur de hêtre (Lemée, 1990) : les chênes sont progressivement éliminés par la compétition, et ne peuvent pas se régénérer sous le couvert de hêtre. Seuls quelques gros chênes ont survécu jusqu'à nos jours, principalement sur les sols podzoliques (Lemée, 1987).

La dynamique naturelle, principalement influencée par les tempêtes (Ponzailler *et al.*, 1997) a donné au peuplement une structure très irrégulière en âge et en densité.

5.2. Plusieurs études se sont intéressées à la réserve de la Tillaie

Parce qu'il s'agit d'un site rare dont la dynamique s'approche d'une dynamique naturelle, la réserve de la Tillaie a fait l'objet de nombreuses études, à la fois sur le peuplement forestier (Grand-Mesnil, 1982; Vivien, 1984; Lemée, 1987; Lemée, 1990) et sa dynamique (Faille *et al.*, 1984; Van Baren & Hilgen, 1984; Ponzailler *et al.*, 1997; Zobi, 1997), la flore et la faune (Guinier, 1950; Lemée, 1966), etc..

En 1973, Bouchon *et al.* (1973) ont réalisé une cartographie assez complète de la réserve, comportant les cartes des sols, des peuplements forestiers et des groupements végétaux. Toutefois, les données de position des arbres n'ont pas été conservées.

Plus récemment, Ponzailler *et al.* (1997) ont étudié les causes de mortalité dans la réserve et le rôle primordial joué par les tempêtes.

Cependant, malgré ces différentes études et le caractère exceptionnel de ce site, les données forestières disponibles sur la réserve étaient encore assez faibles jusqu'en 2000, et concernaient surtout les arbres morts. Pour les arbres vivants, on ne connaissait ni la position ni la circonférence.

Fort heureusement, l'INRA d'Orléans vient de terminer une nouvelle campagne de mesure, qui a permis de cartographier la position et la circonférence de tous les arbres vivants en 2001 (Bedeneau, com. pers.). Ces nouvelles données devraient bientôt pouvoir être analysées.

5.3. En juin 1997, nous avons cartographié et mesuré une portion d'1 ha...

Pendant mon travail de thèse, j'ai organisé une campagne de mesure sur la réserve de la Tillaie avec l'aide de I.C. Zobi et le soutien de A. Faille, J.Y. Ponzailler, M. Boissière, M. Legay, et P. Duplat. L'objectif était d'obtenir des données de position et de circonférence pour le stage de I.C. Zobi (1997). Nous avons principalement mesuré la position, l'espèce et la circonférence de tous les arbres sur une surface de 1.2 ha. Le détail des protocoles de mesure, ainsi que les principaux résultats peuvent être consultés dans Zobi (1997).