

ASSOCIATION DES AMIS DE LA MASSANE

RESERVE NATURELLE DE LA MASSANE

TRAVAUX

72

**ETUDE DES EFFETS DE LA CONJONCTION
SECHERESSE/CANICULE DE 2003
SUR LA FORET DE LA MASSANE**

PAR

Jean-André MAGDALOU, Christophe HURSON et Joseph GARRIGUE

2005

ASSOCIATION DES AMIS DE LA MASSANE

RESERVE NATURELLE DE LA MASSANE

TRAVAUX

72

**ÉTUDE DES EFFETS DE LA CONJONCTION
SÉCHERESSE/CANICULE DE 2003
SUR LA FORÊT DE LA MASSANE**

PAR

J.-A. MAGDALOU, Ch. HURSON et J. GARRIGUE

2005

Laboratoire Arago, BP44-66651-BANYULS-SUR-MER Cedex

ASSOCIATION DES AMIS DE LA MASSANE

RESERVE NATURELLE DE LA MASSANE

TRAVAUX

72

**ÉTUDE DES EFFETS DE LA CONJONCTION
SÉCHERESSE/CANICULE DE 2003
SUR LA FORÊT DE LA MASSANE**

PAR

J.-A. MAGDALOU*, Ch. HURSON et J. GARRIGUE***

2005

*Réserve Naturelle de la Massane, Laboratoire Arago, BP44-66651-BANYULS-SUR-MER Cedex

**Confédération des Réserves Naturelles Catalanes, 32, allées Arago, 66 500 PRADES

SOMMAIRE

RÉSUMÉ

| | |
|---|----|
| I - INTRODUCTION | 1 |
| II – 2003 : UN CONTEXTE CLIMATIQUE EXCEPTIONNEL | 3 |
| 1 – Caractéristiques du mésoclimat de la forêt de la Massane | 3 |
| 2 – La sécheresse | 4 |
| 3 – Les températures caniculaires | 5 |
| 4 – La conjonction exceptionnelle des deux facteurs | 6 |
| 5 – Climatologie 2004 et 2005 | 7 |
| III – EFFETS DES PERTURBATIONS CLIMATIQUES DE L'ÉTÉ 2003 | 8 |
| 1 – Une conjonction de contraintes pour les peuplements forestiers | 8 |
| 2 - Méthodologie | 9 |
| 2.1 – Paramètres étudiés | 9 |
| 2.2 – Outils informatiques | 11 |
| 2.3 – Traitement informatique des données | 13 |
| 3 – Premier bilan des effets de la sécheresse/canicule 2003 sur le peuplement forestier | 16 |
| 3.1 – Cas de mortalité | 17 |
| 3.1.1. la réserve intégrale | 17 |
| 3.1.2. la ripisylve | 18 |
| 3.1.3. Synthèse des cas de mortalité | 19 |
| 3.2 – Cas de dépérissement | 21 |
| 3.2.1. Cas de dépérissement dans la réserve intégrale | 21 |
| 3.2.2. Cas de dépérissement dans la ripisylve | 23 |
| 3.2.3. Bilan des cas de dépérissement | 23 |
| 3.3 – Vulnérabilité aux parasites : le cas des champignons lignicoles | 24 |
| 3.3.1 – <i>Les cas de Fomes fomentarius, Oudemansiella mucida et Inonotus radiatus</i> | 25 |
| 3.4 – Situation par espèces | 27 |
| 3.4.1. <i>le Hêtre Fagus sylvatica</i> | 27 |
| 3.4.2. <i>le Chêne pubescent Quercus humilis</i> | 29 |
| 3.4.3. <i>l'Aulne glutineux Alnus glutinosa</i> | 29 |
| IV – AUTRES PERTURBATIONS POUVANT AVOIR UNE INFLUENCE SUR L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER | 31 |
| 1 – Les précipitations du 12 novembre 1999 | 31 |
| 2 – Les précipitations du 16 avril et 3 mai 2004 | 32 |
| 3 – L'ozone | 32 |
| V - CONCLUSION | 34 |
| BIBLIOGRAPHIE | 36 |
| REMERCIEMENTS | 38 |

RÉSUMÉ

Située à l'extrémité orientale des Pyrénées, la Réserve Naturelle de la Massane (Argelès-sur-Mer, Pyrénées-Orientales) occupe toute la haute vallée de la rivière du même nom de 600 à 1158 m d'altitude sur le massif de l'Albera. Elle est considérée comme une hêtraie méridionale. L'exploitation forestière a été abandonnée à la fin du XIX^{ème} siècle et la seule activité qui subsiste est l'élevage extensif de bovins.

Lors de l'été 2003, la forêt de la Massane a été soumise à d'importantes contraintes, hydriques (seulement 30 mm de pluie reçus en juin, juillet et août) et thermiques (19 jours avec des maxima supérieurs à 30° C au mois d'août, un record absolu avec 37,3°C le 13 août). Cette conjonction prolongée sécheresse/canicule est un des fait marquants pour les 40 dernières années d'enregistrement à la station météorologique installée sur ce site. Il semblait alors nécessaire d'étudier les conséquences d'un tel événement climatique sur les peuplements forestiers de la Massane.

Parallèlement au suivi de son mésoclimat, la Réserve Naturelle dispose depuis 1999 d'une base de données cartographique permettant un suivi individuel de plus de 48678 arbres de 30 espèces différentes, sur une surface de 28,8 ha correspondant à 15% de l'habitat forestier du site (9,4 ha en réserve intégrale et 19,4 ha en ripisylve). L'ensemble des données a été stocké dans une base de données construite sous Access. L'interface de saisie Mapinfo/Access conçue par le service S.I.G. de la Confédération des Réserves Naturelles Catalanes permet à la fois le stockage des données relatives à l'état initial du peuplement, la prise en compte de l'évolution des individus et la visualisation cartographique des données.

A partir de la connaissance de l'état physiologique des arbres avant l'épisode climatique exceptionnel de 2003, les données relevées postérieurement permettent de préciser l'évolution de l'état physiologique des individus due en partie aux contraintes hydriques et thermiques de l'été 2003.

Les arbres ont été contrôlés individuellement lors de relevés de terrain en 2004 et 2005. Sur les 29524 arbres suivis qui étaient vivants en décembre 2002, 770 cas de mortalité peuvent être attribués à la sécheresse/canicule de 2003. Ils concernent 16 espèces sur les 30 représentées. *Fagus sylvatica*, *Quercus humilis* et *Alnus glutinosa* ont été sévèrement touchés avec respectivement 4,14%, 2,28% et 12,76% de mortalité.

Les cas de dessèchements prématurés de tout ou partie du feuillage ont été considérés comme d'autres conséquences visibles des stress, hydrique et thermique, de l'été 2003. Dans la réserve intégrale, les hêtres sont de loin les arbres les plus touchés (15,5% des effectifs) tandis que dans la ripisylve, ils ne sont que 6,3%. 10,3% des aulnes glutineux présentent ce symptôme. C'est aussi l'espèce qui affiche la plus forte mortalité. L'Aulne glutineux est l'espèce qui a le plus mal supporté les contraintes climatiques de 2003. Pour cette espèce, les contraintes de l'été 2003 ont été décisives pour de nombreux individus déjà affaiblis par l'importante crue de novembre 1999.

Bien que présentant une grande diversité d'espèces de champignons, à la Massane, seules quelques espèces ont fait l'objet de relevés antérieurs et postérieurs à l'épisode 2003 : *Armillaria mellea*, *Fomes fomentarius*, *Hericium clathroides*, *Hypholoma* sp., *Oudemansiella mucida*, *Pleurotus ostreatus*, *Laetiporus sulfureus*, *Ganoderma* sp., *Inonotus radiatus*, *Gymnopilus spectabilis*, *Pholiota alnicola*, *Meripilus giganteus*,. La présence accrue de champignons lignicoles est certainement une conséquence des stress, hydrique et thermique, rendant les arbres plus vulnérables aux parasites. Depuis la fin de l'épisode climatique exceptionnel de 2003, le nombre d'arbres vivants porteurs d'au moins un champignon lignicole a triplé. Ils étaient 54 dans la réserve intégrale et 115 dans la ripisylve lors des relevés antérieurs à l'été 2003. La réserve intégrale en compte aujourd'hui 193 et la ripisylve 374.

L'ampleur des conséquences sur les peuplements forestiers (mortalité, dépérissement) d'événements climatiques comme ceux de l'été 2003 dépendent pour beaucoup des contraintes antérieures ou à venir, notamment des violents épisodes hydrologiques auxquels est soumise la ripisylve ou l'impact de polluants. A ce propos, une étude réalisée durant l'été 2000 sur le littoral des Pyrénées-Orientales a montré l'importance de l'ozone. « *Les valeurs les plus élevées en moyenne sont mesurées sur le site rural de la réserve de la Massane, au dessus d'Argelès-sur-Mer* » (A. FROMAGE-MARIETTE et al, 2001).

Cette base de données permet d'apporter des précisions sur l'évolution de l'écosystème forestier face aux perturbations climatiques. Les gestionnaires d'espaces forestiers manquent de références pour évaluer dès aujourd'hui les conséquences de tels événements. Leurs périodes de retour demeurent inconnues mais tout laisse penser à une multiplication de ces phénomènes à l'avenir. Dans tous les cas, un suivi permettant de mesurer les conséquences de tels épisodes climatiques ne peut s'inscrire que dans la durée : mortalité et récupération de certains individus affaiblis par l'intensité et la durée de l'épisode climatique (court ou moyen terme), composition spécifique et structure du peuplement (long terme), etc.

Le Hêtre se trouve à la Massane en limite de son aire de répartition. Cette situation marginale si les craintes des scientifiques quant à la fréquence future d'événements climatiques comparables à ceux de l'été 2003 se vérifiaient, compromettrait certainement le maintien de la Hêtraie dans cette haute-vallée du massif de l'Albera. De par sa situation, la Hêtraie de la Massane peut donc être considérée comme un poste avancé du changement global et comme un laboratoire naturel pour observer la réponse des peuplements forestiers aux perturbations diverses.

Encouragée par le réseau RNF (Réserves Naturelles de France), la mise en place de suivis réguliers s'avère aujourd'hui nécessaire pour évaluer l'impact des épisodes climatiques : il est nécessaire pour cela de disposer de données de référence antérieures à l'évènement. C'est pourquoi il est essentiel de financer régulièrement des suivis (ou plutôt des veilles) à long terme.

I - INTRODUCTION

Face aux nombreuses interrogations quant à la fréquence future plus grande d'épisodes climatiques exceptionnels comme celui de l'été 2003 et à l'impact de ces phénomènes sur les peuplements forestiers, il semblait nécessaire de réaliser une étude sur la forêt de la Massane. Située à l'extrémité orientale des Pyrénées sur le massif de l'Albera, la Réserve Naturelle de la Massane protège une portion de 336 hectares de la forêt communale d'Argelès-sur-Mer. Elle occupe la haute-vallée de la rivière Massane de 600 à 1158 m d'altitude. Le hêtre qui est la principale essence du peuplement se trouve en marge de son aire de répartition. D'ailleurs, en se référant à QUÉZEL et *al.* (2003), la moyenne des minima du mois le plus froid de l'année qui est de 1,9°C à la forêt de la Massane correspondrait à l'étage altitudinal de végétation méso-méditerranéen. Du fait de cette situation originale, la hêtraie de la Massane peut être qualifiée de méridionale. L'exploitation forestière a été abandonnée à la fin du XIX^{ème} siècle et la seule activité sylvopastorale qui subsiste est l'élevage extensif de bovins.

La Réserve de la Massane est engagée depuis plus de 40 ans dans l'étude du mésoclimat du site. Parallèlement à la météorologie, la Réserve Naturelle dispose d'une base de données cartographique permettant un suivi individuel de 48678 arbres sur une surface de 28,8 ha.

En plus des nombreux enseignements sur le fonctionnement d'un peuplement forestier en libre évolution, ces travaux devraient permettre d'apporter des informations précises sur l'évolution de la végétation face aux changements climatiques. Cette étude ne prétend en aucun cas établir un pronostic sur la survie des arbres et sur la structure des peuplements suite à l'épisode climatique estival de 2003. Cela serait prématuré et ne pourrait se réaliser que sur du très long terme mais il est d'ores et déjà possible de relever certains effets des contraintes hydriques (sécheresse) et thermiques (canicule) sur les peuplements cartographiés.

Les gestionnaires d'espaces forestiers manquent de référence pour évaluer dès aujourd'hui les conséquences de tels événements sur les peuplements. Leur période de retour demeure inconnue mais tout laisse penser à une multiplication de ces phénomènes dans l'avenir. Nous espérons alors que les décideurs et les financeurs conscients de ces problèmes soutiendront durablement des études à long terme comme celles engagées dans la Réserve Naturelle de la forêt de la Massane. Dans tous les cas, un travail permettant de mesurer les conséquences d'un tel épisode climatique ne peut s'inscrire que dans la durée : mortalité et récupération de certains individus affaiblis par l'intensité et la durée de l'épisode climatique (court ou moyen terme), composition spécifique et structure du peuplement (long terme), etc.

Le réseau des Réserves Naturelles de France avait initié une enquête sur les effets de la canicule et les feux en 2003 (RNF, 2003) posant les questions suivantes :

Avez-vous observé des effets de la canicule sur votre RN ?

Avez-vous mis en place des dispositifs spécifiques de conservation ?

Avez-vous mis en place des dispositifs spécifiques de suivi des impacts ?

La plupart des réserves qui avaient répondu, une cinquantaine, déclaraient avoir observé des effets dus à la canicule. Aucun dispositif spécifique n'a été mis en place, et seules les Réserves ayant déjà des protocoles en place, pourront évaluer l'impact de cet épisode, notamment pour le peu de Réserves ayant des suivis piézométriques, ou celles engagées dans l'observation de l'évolution des odonates, des hydrophytes, ou d'autres groupes.

Une des propositions de RNF était de mettre en place des suivis réguliers à long terme afin d'évaluer l'impact des épisodes climatiques : il est important de rappeler que pour cela, il

est nécessaire de disposer de données de référence antérieures à l'évènement. C'est pourquoi il est essentiel de financer régulièrement des travaux (ou plutôt des veilles) à long terme.

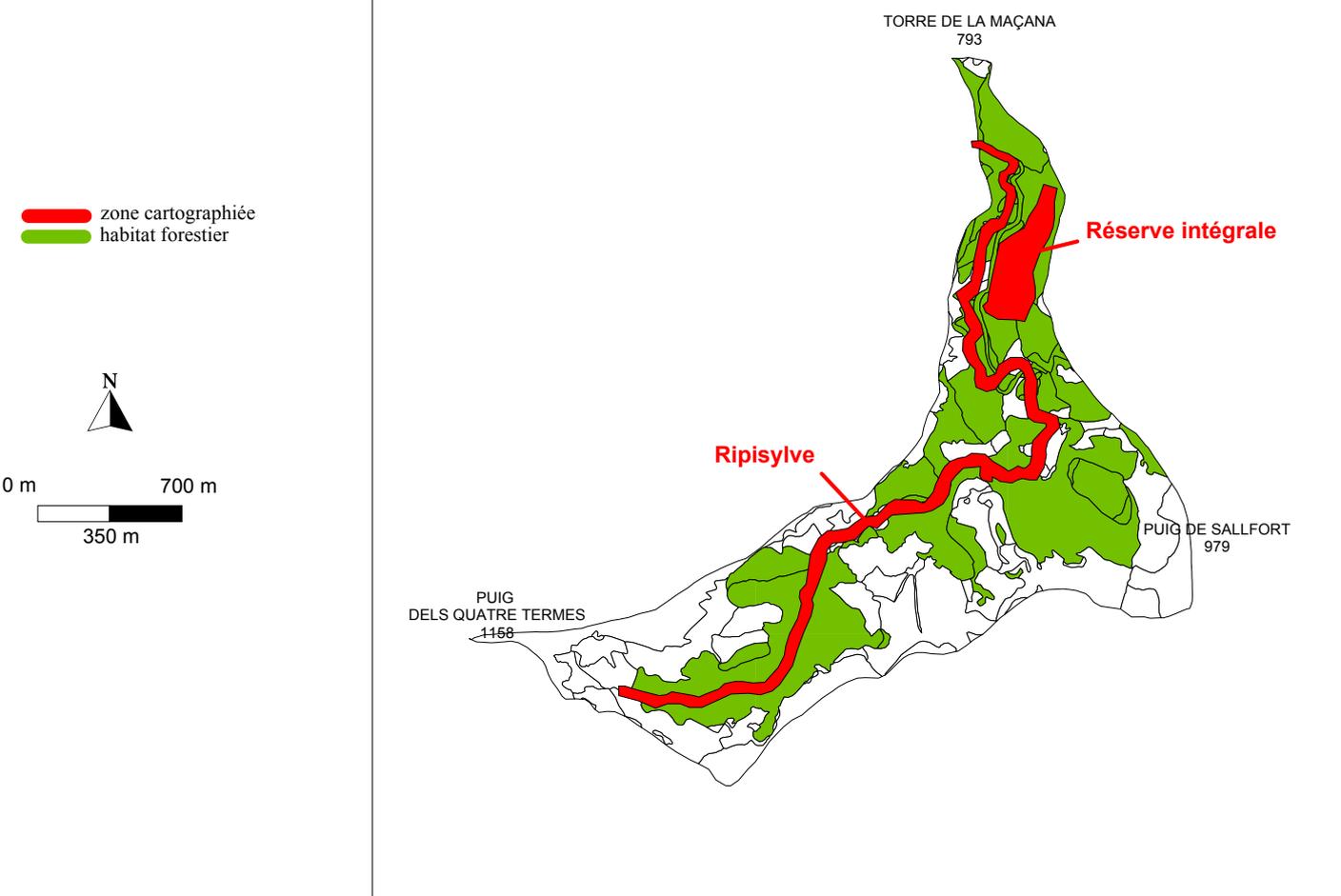
Les études cartographiques menées sur la Réserve Naturelle de la forêt de la Massane s'inscrivent dans cette politique à long terme.

Réserve Naturelle de la forêt de la Massane

Carte de situation

Créée par Arrêté Ministériel du 12/08/1973,
elle est gérée par l'Association des Amis de la Massane
et fait partie de la Confédération des Réserves Naturelles Catalanes
(Département des Pyrénées-Orientales).

Elle occupe 336 ha de la Commune d'Argelès sur Mer.



II – 2003 : UN CONTEXTE CLIMATIQUE EXCEPTIONNEL

1 – Caractéristiques du mésoclimat de la forêt de la Massane

Le suivi météorologique initié en 1959 avec l'installation d'un pluviomètre totalisateur et poste équipé d'un hygrothermomètre et de thermomètres à maxima et à minima a permis de mettre en évidence les caractéristiques du mésoclimat forestier de la haute-vallée de la Massane. Il tend à s'améliorer avec, depuis le 6 juin 1996, l'installation d'une station électronique automatique permettant également de prendre en compte le rayonnement solaire.

Depuis la première contribution à la connaissance du mésoclimat (TRAVÉ et DURAN) parue en 1984, les données sont analysées chaque année et paraissent dans des fascicules des *Travaux de la Réserve Naturelle de la Massane*. Une nouvelle synthèse (TRAVÉ, et al.) a été rédigée en 1996 avec des moyennes mensuelles et annuelles qui portent sur des périodes d'une durée significative (35 ans pour les précipitations et 20 pour les températures). Aujourd'hui, les données concernent 43 ans pour les précipitations et 28 ans pour les températures.

Le diagramme ombrothermique ci-après synthétise les principales caractéristiques du mésoclimat de la Massane.

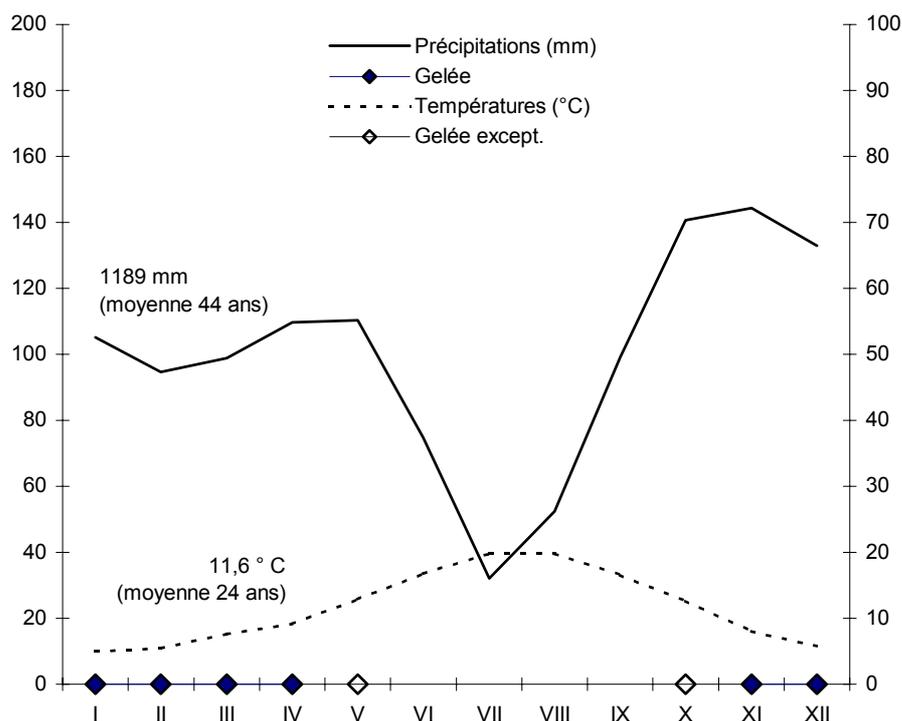


Diagramme ombrothermique (P=2T) inspiré de R. FOLCH i GUILLEM (1981)

Ce diagramme ne montre pas la grande variabilité caractéristique d'un climat de type méditerranéen. Une grande partie des eaux reçues lors de pluies torrentielles automnales ou printanières n'est que partiellement assimilable par la végétation. Elle l'est encore moins sur les versants pentus sur lesquels le transfert des eaux pluviales vers les fonds de vallée est encore plus rapide.

2 – La sécheresse

La sécheresse estivale est la principale caractéristique du climat méditerranéen. Pour KÖPPEN (1918), des précipitations mensuelles inférieures à 30 mm caractérisent un mois sec. La pluviométrie moyenne mensuelle de la haute vallée de la Massane ne fait pas ressortir de mois sec. Cependant, le mois de juillet s'en approche avec 32,7 mm.

Si les moyennes des 43 dernières années ne mettent pas en évidence de mois secs du fait de la grande variabilité des précipitations mensuelles, 126 mois parmi lesquels 44 sont des mois d'été (juin, juillet ou août) affichent une pluviométrie strictement inférieure à 30 mm. Depuis 1960, 21 mois de juillet étaient d'ailleurs en dessous de ce seuil. Ci-dessous sont sélectionnées les quelques années pour lesquelles la sécheresse est caractérisée par trois mois consécutifs à pluviométrie inférieure à 30 mm, ou par un déficit annuel de la quantité d'eau reçue.

| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Total |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1973 | 135 | 13 | 12 | 29 | 34 | 157 | 37 | 48 | 3 | 42 | 15 | 226 | 751 |
| 1978 | 66 | 74 | 129 | 158 | 148 | 42 | 9 | 12 | 30 | 13 | 10 | 122 | 813 |
| 1984 | 27,6 | 36,7 | 219,4 | 108 | 185 | 28,2 | 1,7 | 29,2 | 159 | 16,3 | 230,8 | 55,6 | 1097,5 |
| 1986 | 40,4 | 200,6 | 243,8 | 86,1 | 14,8 | 9,5 | 6,9 | 27,1 | 57,6 | 520,5 | 128,6 | 22 | 1357,9 |
| 1989 | 41,1 | 52,8 | 14,1 | 134,7 | 21 | 27 | 12,5 | 95,9 | 64,6 | 24,3 | 380,3 | 162 | 1030,3 |
| 1994 | 34,7 | 95 | 5,9 | 52,7 | 34,8 | 25,4 | 4,2 | 10,3 | 217,8 | 84 | 62,4 | 87,3 | 714,5 |
| 1995 | 48,5 | 6,2 | 12,7 | 15,1 | 66,8 | 8,7 | 48,2 | 53,4 | 100,6 | 74,7 | 148,4 | 360,2 | 943,5 |
| 2003 | 27,6 | 354 | 106,4 | 47,6 | 136,6 | 4,2 | 5 | 20,8 | 43,2 | 336,6 | 74,6 | 231,2 | 1387,8 |

Cumul mensuel des précipitations (mm) pour les années à sécheresse de durée significative (au moins trois mois consécutifs à pluviométrie inférieure à 30 mm).

| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Total |
|-------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| 1973 | 135 | 13 | 12 | 29 | 34 | 157 | 37 | 48 | 3 | 42 | 15 | 226 | 751 |
| 1985 | 11,8 | 30,8 | 48,2 | 69,2 | 157,7 | 60,2 | 10,4 | 34,6 | 0,5 | 172 | 77,2 | 37,3 | 709,9 |
| 1990 | 81 | 15,5 | 21,6 | 64,2 | 43,5 | 82,1 | 42,4 | 71,1 | 81 | 106,5 | 45,8 | 16,2 | 670,9 |
| 1994 | 34,7 | 95 | 5,9 | 52,7 | 34,8 | 25,4 | 4,2 | 10,3 | 217,8 | 84 | 62,4 | 87,3 | 714,5 |
| 1998 | 46,8 | 57 | 6,8 | 99,6 | 36,2 | 41,8 | 5,2 | 107 | 94 | 64 | 35 | 209 | 802,4 |

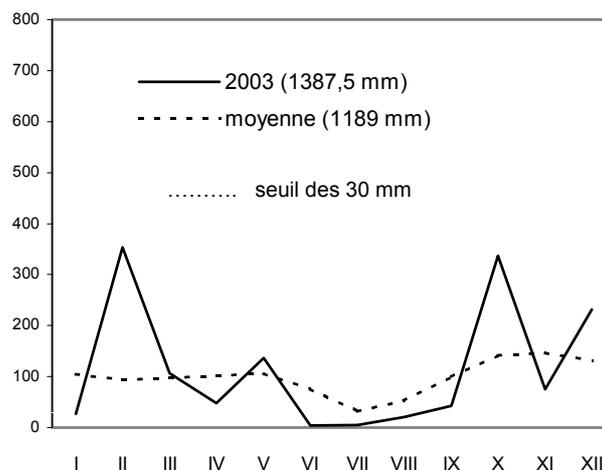
Cumul mensuel des précipitations (mm) pour les 5 années les plus sèches connues depuis le début des enregistrements.

Depuis le début des enregistrements, huit années ont connu au moins trois mois consécutifs à pluviométrie inférieure à 30 mm. Pour quatre années seulement, cette période de sécheresse est strictement estivale. Sur les cinq années les plus sèches depuis le début des enregistrements, deux présentaient une sécheresse sur trois mois consécutifs.

Ces approches pour évaluer l'intensité des périodes de sécheresse ne tiennent cependant pas compte de l'influence prépondérante du vent, en particulier des forts vents de NW, ni des calculs plus complexes du point de flétrissement du sol ni ceux concernant la réserve utile en eau. L'importance de la pluviométrie utile pour les plantes en région méditerranéenne a été démontrée par différents auteurs (ZERAIA, 1981).

« Si les valeurs moyennes ou normales annuelles sont des bases solides pour la classification des climats, leur utilisation en zone méditerranéenne n'est guère pertinente. Des cumuls annuels deux fois supérieurs à la moyenne, peuvent en effet être observés même pour des années avec sécheresse estivale très prononcées. Du point de vue du fonctionnement des écosystèmes forestiers, le cumul de pluie sur la période de croissance de la végétation est

un descripteur de l'ampleur de la sécheresse estivale bien pertinent » (RAMBAL et RATTE, 2005).



Hauteurs mensuelles des précipitations (mm) en 2003 et moyennes des 43 dernières années (exceptée 1965)

Depuis le début des enregistrements, l'année 2003 se distingue par la plus faible quantité d'eau tombée durant trois mois consécutifs, toutes périodes confondues. Elle constitue de ce fait l'année record en terme de sécheresse estivale. Les mois de juin, juillet et août n'ont en effet cumulé que 30 mm.

Contrairement à d'autres années à sécheresse estivale marquée, l'hiver et le printemps 2003 ont connu trois mois excédentaires (mars et mai) et l'année a été précédée d'une année à pluviosité supérieure à la moyenne (1442,2 mm en 2002).

3 – Les températures caniculaires

En 2003, la moyenne annuelle des températures (13° C) est nettement supérieure à la moyenne des 28 dernières années (11,6° C) mais 1994 reste l'année record avec 13,1° C. C'est toutefois l'année 2003 qui détient le record absolu des 28 dernières années de la température la plus élevée avec 37,3°C le 13 août. Le précédent record remonte au 6 juillet 1982 avec 36,5°C. Mais c'est à travers le nombre de jours chauds et très chauds en 2003, largement supérieur à la moyenne, qu'apparaît le caractère exceptionnel de 2003. 1994 est l'année qui en comptait jusqu'à lors le plus grand nombre.

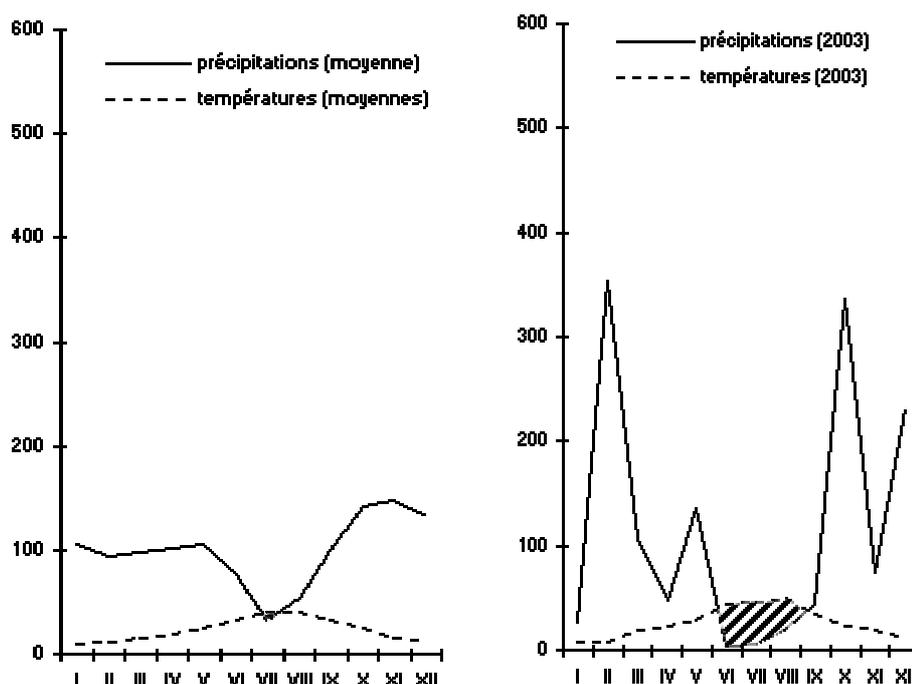
| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | Année |
|-----------------------|----|----|----|----|-----|-----|------|------|-----|-----|----|----|-------|
| 2003 | | | | | | | | | | | | | |
| Jours chauds | | | | | 4 | 22 | 24 | 28 | 3 | | | | 81 |
| Jours très chauds | | | | | | 5 | 12 | 19 | | | | | 36 |
| 1994 | | | | | | | | | | | | | |
| Jours chauds | | | | | 2 | 7 | 25 | 23 | 5 | | | | 62 |
| Jours très chauds | | | | | | 1 | 6 | 7 | | | | | 14 |
| Moyenne 28 ans | | | | | | | | | | | | | |
| Jours chauds | | | | | 1 | 6,2 | 15,1 | 13,1 | 3,7 | 0,3 | | | 39,6 |
| Jours très chauds | | | | | 0,1 | 0,5 | 2,9 | 2,9 | 0,1 | | | | 6,6 |

Nombre de jours chauds ($T^{\circ} \geq 25^{\circ}C$) et très chauds ($T^{\circ} \geq 30^{\circ}C$) en 1994, 2003 et moyenne annuelle des 28 dernières années.

En 2003, la période de fortes températures a commencé de manière significative en juin et s'est prolongée jusqu'à fin août. Le mois d'août a d'ailleurs compté 19 jours avec des maxima supérieurs à 30° C dont 14 jours consécutifs à partir du 1^{er} août. C'est cette période qui peut être à juste titre qualifiée de caniculaire.

4 – La conjonction exceptionnelle des deux facteurs

Les graphiques ombrothermiques de BAGNOULS et GAUSSEN (1953) permettent de mettre en évidence les périodes de sécheresse.



Graphiques ombrothermiques ($P=2T$) d'après les enregistrements de la station de la Massane : moyennes et année 2003. Les 12 mois de l'année sont portés en abscisses et les précipitations (mm) et les températures (degré Celsius) en ordonnées selon une échelle conventionnellement établie : l'échelle des températures est le double de celle des précipitations. L'intersection des deux courbes (zone hachurée) permet de déterminer, en étendue et en importance, les périodes de sécheresse.

Les courbes des moyennes font apparaître un régime ombrothermique de type méditerranéen atténué : une période sèche d'ampleur limitée ressort en début d'été.

L'année 2003 se distingue par la pluviométrie estivale la plus faible depuis 1960 et par les fortes températures du mois d'août.

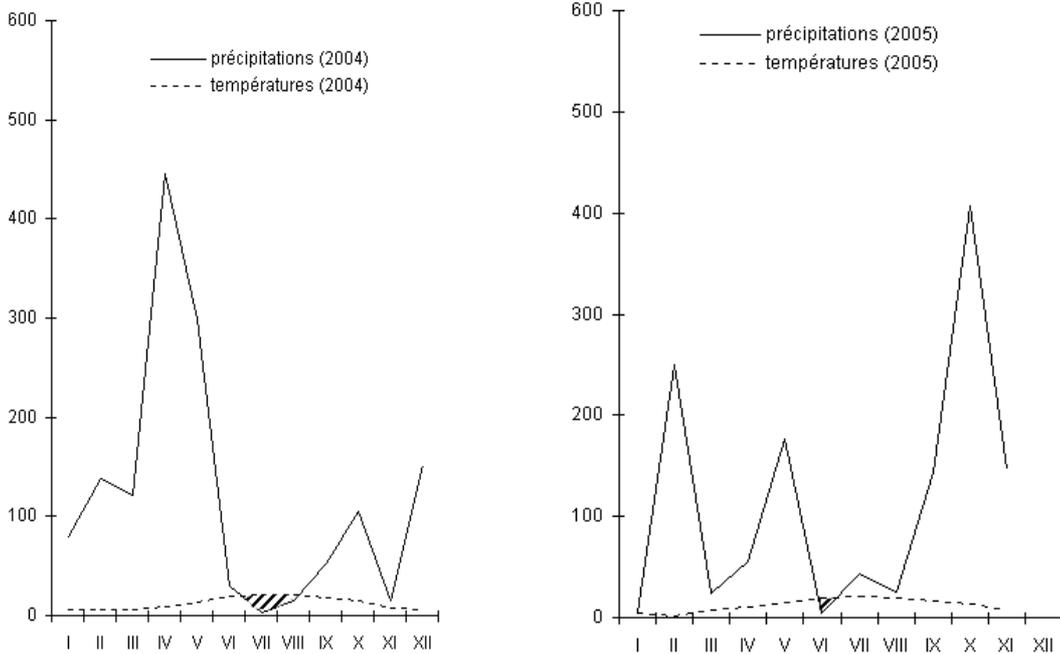
La canicule est apparue en 2003 dans un contexte déjà très défavorable aux peuplements forestiers puisque ces derniers étaient soumis à une importante sécheresse depuis début juin.

Cette conjonction prolongée entre sécheresse et forte chaleur représente une situation exceptionnelle et constitue un des faits marquants de la climatologie de la haute-vallée de la Massane depuis le début des enregistrements.

5 – Climatologie 2004 et 2005

L'été 2004 n'a pas connu de températures aussi fortes qu'en 2003. En revanche, les mois d'été ont reçu une très faible quantité d'eau. D'intensité moins marquée que pour la sécheresse estivale de 2003, cette période déficitaire en eau intervient sur des peuplements forestiers affaiblis par les contraintes, hydriques et thermiques, de l'été précédent.

L'année 2005 est marquée par les fortes pluies d'octobre (400 mm en une semaine) qui ont favorisé la fructification des champignons cet automne mais également par la montée soudaine des eaux de la rivière lors des précipitations du 5 septembre, avec près de 100 mm tombés en une heure. Cet épisode a littéralement « décapé » le sol de la forêt, mais également le lit de la rivière, et provoqué une érosion très forte sur l'ensemble des ravins. Il est vraisemblable que cet événement aura des conséquences aggravantes sur la santé des arbres.



Graphiques ombrothermiques ($P=2T$) d'après les enregistrements de la station de la Massane : années 2004 et 2005. Les 12 mois de l'année sont portés en abscisses et les précipitations (mm) et les températures (degré Celsius) en ordonnées selon une échelle (11 pour 2005) conventionnellement établies : l'échelle des températures est le double de celle des précipitations. L'intersection des deux courbes (zone hachurée) permet de déterminer, en étendue et en importance, les périodes de sécheresse.

III – EFFETS DES PERTURBATIONS CLIMATIQUES DE L'ETE 2003

1 – Une conjonction de contraintes pour les peuplements forestiers

Au cours de l'été 2003, les peuplements forestiers ont subi d'importantes contraintes hydriques et thermiques. Depuis la grande sécheresse de 1976 dans le nord de la France, les mécanismes mis en place par les arbres en réponse à ces contraintes sont bien connus. Les travaux initiés après cet événement sur des cas de dépérissements forestiers attribués à la sécheresse ont clairement établi que les effets différés de tels accidents climatiques étaient parfois détectés bien des années plus tard, parfois jusqu'à plus de 10 ans. D'autre part, les conséquences de tels événements sont fortement modulées par les contraintes passées et à venir.

En réponse aux contraintes hydriques, les arbres mettent en place des mécanismes de régulation de leur consommation en eau. Dans le cas d'une sécheresse prolongée, des mécanismes de protection, irréversibles cette fois, vont se mettre en place affectant le système conducteur des pétioles des feuilles, voire des rameaux. Les feuilles ne sont plus alimentées par la sève et se dessèchent. Elles peuvent alors tomber au sol, flétries mais encore vertes (BRÉDA *et al.*, 2003). Dans la forêt de la Massane, dès le début du mois d'août, la chute de feuilles encore vertes révélait l'intensité du stress hydrique auquel les arbres étaient soumis.

Quand la canicule survient dans un contexte de forte régulation des arbres par une sécheresse déjà bien en place, les fortes températures sont létales pour de nombreux organes. Pendant et juste après cet épisode climatique exceptionnel, un certain nombre d'effets visibles pouvant être attribués à la conjonction sécheresse/canicule ont été relevés : coloration automnale prématurée des feuillages, chutes de feuilles, dessèchement de rameaux ou de branches. Il est cependant difficile de distinguer consécutivement à une telle perturbation les signes annonçant un dépérissement de l'arbre d'autres effets qui ne sont que la traduction visible des stratégies de protection mis en place par les arbres en réponse aux contraintes (BRÉDA *et al.*, 2003).

Dans tous les cas, les arbres auront été affectés par un tel événement climatique. Des arbres récupéreront, certains vont mourir et d'autres vont dépérir plus progressivement. Les réactions seront différentes en fonction des individus et des espèces et détectables sur du long terme. Cette présente étude ne peut donc suffire à dresser un bilan décisif des conséquences de la sécheresse/canicule de 2003 sur les peuplements mais permet d'évaluer les conséquences directes d'un tel épisode climatique sur le peuplement forestier et peut préciser les prémices du phénomène.

2 – Méthodologie

2.1 – Paramètres étudiés

La Réserve Naturelle de la forêt de la Massane a entrepris en 1999 un inventaire cartographique exhaustif des peuplements. Cet inventaire rejoint les préconisations du programme COST E4 du Conseil de l'Europe visant à identifier et à caractériser les dernières forêts européennes peu modifiées par l'homme. En plus de ces recommandations, l'inventaire à la Massane s'est enrichi de quelques critères supplémentaires : les champignons lignicoles, un lichen (*Lobaria pulmonaria*), les cavités et leurs caractéristiques, les dendrotelmes. La base de données permet aujourd'hui l'observation individuelle de 48678 arbres sur une superficie de 28,8 ha correspondant à 15% de l'habitat forestier (voir carte de situation). L'étude des effets de la conjonction sécheresse/canicule de l'été 2003 ne portera en revanche que sur 29524 individus. Cette valeur correspond au nombre d'arbres vivants sur pied (hauteur supérieure ou égale à 0,3 m) dans la réserve intégrale et la ripisylve avant la perturbation climatique. Si cette cartographie exhaustive a été réalisée dans le souci de connaître les processus organisationnels des forêts à caractère naturel, de suivre la dynamique forestière d'un écosystème en libre évolution et de mieux connaître la répartition spatiale des espèces, elle n'en est pas moins un « laboratoire naturel » permettant le suivi de mécanismes dus aux changements climatiques.

En se reportant aux trois précédents rapports, le lecteur trouvera plus de détails quant à la méthodologie utilisée pour l'acquisition des données sur le terrain et pour l'intégration de celles-ci dans le Système d'Information Géographique de la Réserve Naturelle : (GARRIGUE et MAGDALOU, 2000, 2003) et (MAGDALOU et al., 2002).

Les données initiales sont stockées dans un Système d'Informations Géographiques (logiciel MapInfo).

▪ Information géographique

Chaque objet (arbre vivant ou mort sur pied et arbre mort au sol) dispose de coordonnées géographiques en X et Y et d'un code permettant de l'individualiser.

▪ Caractéristiques des individus

- l'espèce
- le diamètre DBH (*Diameter Breast Height*) c'est à dire relevé à hauteur de poitrine soit à 1,3 m du sol.
- La hauteur est relevée systématiquement pour les individus de hauteur supérieure ou égale à 30 cm et de hauteur inférieure à 1,3 m.
- Les souches et les chandeliers (arbres morts sur pied de hauteur supérieure ou égale à 1,3 m) ont été relevés de la même manière que les arbres vivants sur pied. Les arbres ou branches au sol de diamètre supérieur ou égale à 10 cm ont été relevés.
- Pour les arbres morts au sol, l'état de décomposition a été noté selon une échelle de 1 (juste tombé) à 4 (stade de décomposition ultime). Le type de décomposition a été relevé seulement dans le cas d'une décomposition cubique ou pourriture rouge favorable au *Lucanidae Aesalus scarabaeoides*.
- Nombre de tiges sur souche commune (s'il y en a plusieurs, chaque tige compte pour un individu.)
- Arbre précoce ou tardif seulement dans le cas de *Fagus sylvatica* (phénologie du débourrement).

- **Présence de cavité**
 - Cavité de tronc, de branche, de pied ou de dendrotelmes (cuvette).
 - Présence de terreau
 - Indices de présence du Cetoniidae *Osmoderma eremita*
 - Cavité ouverte ou fermée
 - Accès possible ou pas
 - Humidité selon un gradient allant de 0 (sec) à 2 (aqueux)
 - Accès possible ou pas

- **Lierre** (présence de *Hedera helix*)

- **Lichen**
 - la seule espèce relevée est *Lobaria pulmonaria*.

- **Les champignons lignicoles**

Espèces systématiquement relevées : *Armillaria* sp., *Fomes fomentarius* (L. : Fr.) Fr., *Hericium clathroides* (Pall. : Fr.) Pers., *Hypholoma* sp., *Oudemansiella mucida* (Schrad. :Fr.) v. Höhnelt, *Pleurotus ostreatus* Jacq., *Laetiporus sulphureus* (Bull. :Fr.) Murill, *Ganoderma* sp., *Inonotus radiatus* (Sowerby : Fr) P. Karst., *Gymnopilus spectabilis* (Fr.) Singer, *Pholiota alnicola* (Fr. : Fr.) Singer, *Meripilus giganteus* (Pers. : Fr.) P. Karst.

- **Etat sanitaire**
 - Détérioration du houppier (dessèchement partiel du feuillage ou descente récente de cimes)

Les données disponibles donnent une information sur l'état sanitaire des arbres avant l'épisode climatique exceptionnel de 2003. A partir de cette connaissance, les données relevées postérieurement permettent de préciser l'évolution des individus suite aux contraintes hydriques et thermiques de l'été 2003.

Consécutivement à l'été 2003, les effets visibles pouvant être attribués à la conjonction sécheresse/canicule ont été relevés :

- cas de mortalité

- cas de dépérissement de l'arbre (descente de cimes ou mortalité de branches détectables sur l'arbre par un dessèchement prématuré de tout ou partie du feuillage).

- à la vulnérabilité aux parasites (cas des champignons lignicoles)

Les relevés de terrain ont été réalisés dès l'automne 2003 et seuls les cas de mortalité et la présence de champignons avaient été relevés. Tout de suite après un tel épisode climatique, il est difficile de distinguer les effets visibles amorçant un dépérissement de l'arbre des stratégies mises en place par celui-ci face aux contraintes (PAULY et BELROSE, 2005). Pour cette raison, les arbres ont été contrôlés individuellement lors de relevés de terrain pendant les automnes 2004 et 2005.

▪ **Protocole d'étude**

Les relevés de terrain consistent à parcourir l'ensemble des zones étudiées, réserve intégrale et ripisylve, munis d'une cartographie à jour du peuplement. Un relevé fin d'été permet de relever les cas de dépérissement ou de mortalité et de noter l'apparition des champignons comme *Laetiporus sulfureus* ou *Meripilus giganteus* qui sont décomposés ensuite rapidement. Un relevé réalisé à l'optimum de la sortie de champignons qui se situe généralement après les plus fortes pluies d'automne, permet de compléter les relevés sur les champignons et les nouveaux cas de mortalité. D'autres relevés complémentaires peuvent être mis en route à la suite d'événements marquants, comme des fortes pluies printanières (pour la sortie de champignons), des crues, des tempêtes de vent, du gel printanier, plus ponctuellement par la création de chablis...etc.

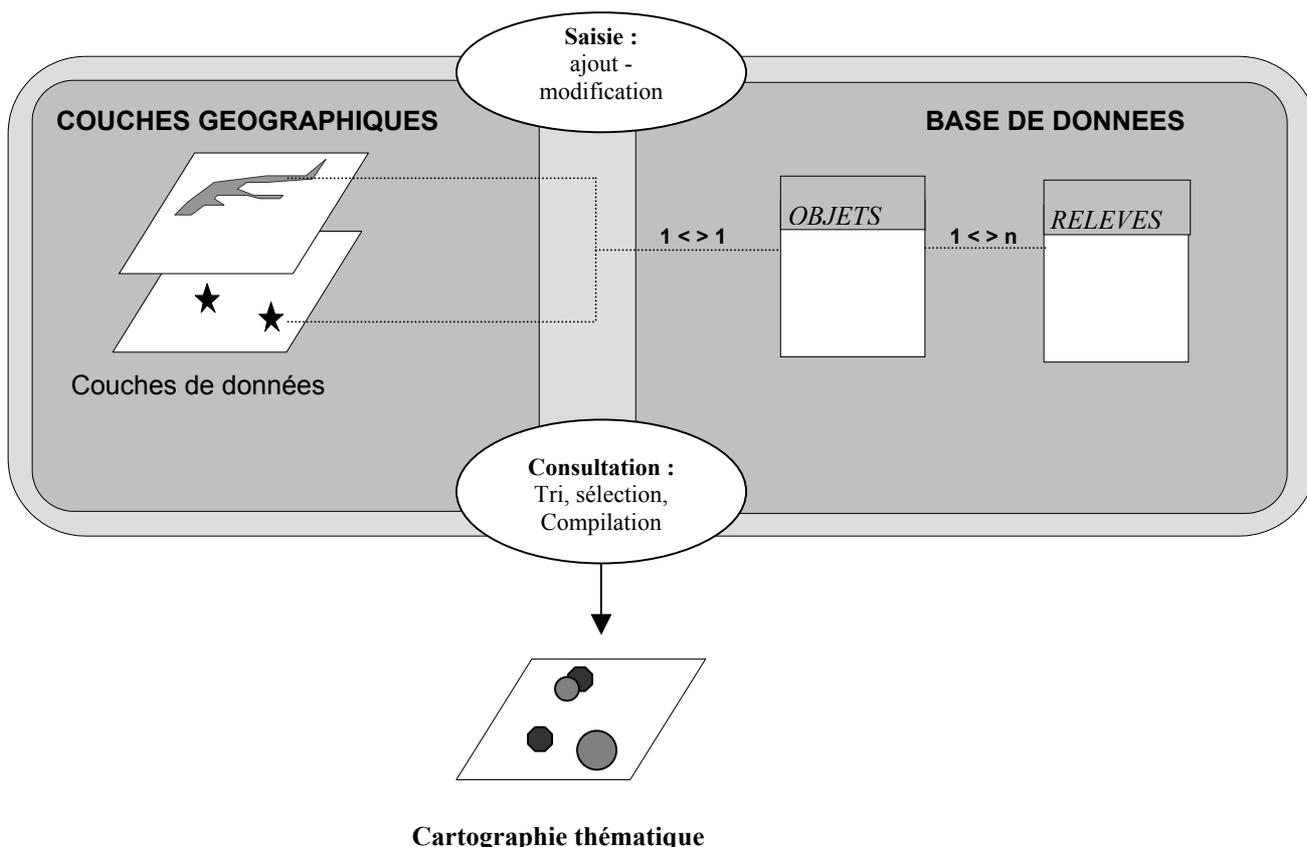
2.2 – Outils informatiques

L'ensemble des données a été stocké dans une base de données construite sous Access. L'interface de saisie Mapinfo/Access conçue par le service S.I.G. de la Confédération des Réserves Naturelles Catalanes permet à la fois le stockage des données relatives à l'état initial du peuplement, la prise en compte de l'évolution des individus et la visualisation cartographique des données.

La base de données développée repose sur le principe d'un suivi dans le temps du peuplement, à la fois des entités physiques « arbres » (les arbres vivants ou morts, ainsi que leurs morceaux au sol) et d'un certain nombre de paramètres complémentaires relevés sur chaque arbre.

Les arbres sont géoréférencés et représentés graphiquement par des points s'ils sont sur pied, ou des polygones s'ils sont au sol, dans deux couches Mapinfo distinctes. Toutes les informations descriptives (espèce, données issues des campagnes de collectes de terrain) sont stockées dans différentes tables d'une base Microsoft Access. Il existe autant de tables de relevés que de thématiques de relevés (mesures dendrométriques, présence de champignons lignicoles, recherche de cavités et d'invertébrés, de lichens, de lierre, état sanitaire).

APPLICATION DE MISE A JOUR ET DE CONSULTATION :
Interface combiné Mapinfo + Ms Access



Les fichiers datant d'un premier inventaire comptaient 48678 individus. Ces données initiales au format Mapinfo ont été basculées dans la base de données, puis complétées avec les relevés réalisés après 2002. Un interface a été développé pour modifier l'information, c'est à dire ajouter ou supprimer des arbres au fur et à mesure de l'évolution du peuplement (régénération, vieillissement), ou d'enregistrer de nouveaux relevés issus des campagnes de terrain. La structure de la base s'inscrit véritablement dans une optique de suivi temporel : les enregistrements ne sont pas modifiés, mais de nouveaux enregistrements datés sont générés en cas de changements.

Par exemple, si un arbre vivant meurt et tombe au sol, le point qui le représentait ne sera pas supprimé. Un champ « date de disparition » sera renseigné avec la date à laquelle le constat est fait ; l'objet point (représentant l'arbre vivant avant sa chute) reste dans la base et un nouvel objet polygone (représentant l'arbre mort au sol) est dessiné.

Par conséquent, le lot de données représenté par le couple couches Mapinfo/données Access ne correspond à aucune réalité physique précise : il s'agit d'un ensemble d'enregistrements (cartographiques et tabulaires) emmagasinant les variations successives d'informations. C'est par un travail de sélection, utilisant notamment les dates de relevés que la réalité du peuplement peut être restituée à un instant précis.

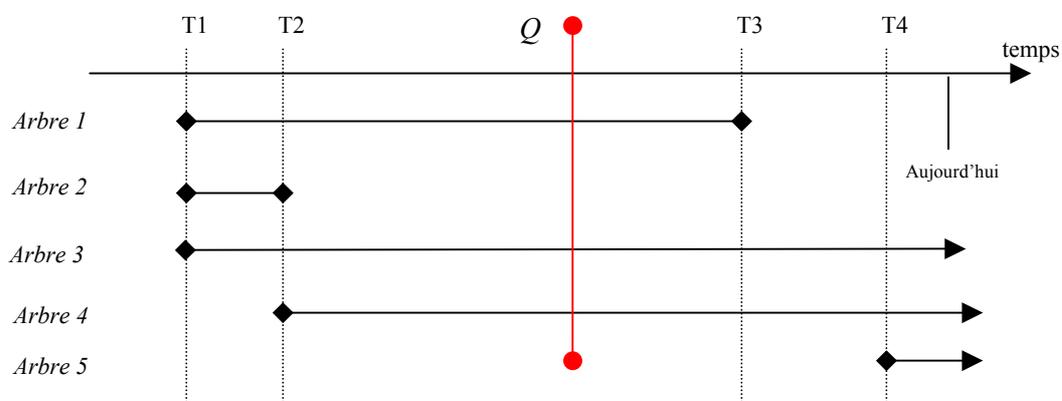
2.3 – Traitement informatique des données

En exécutant des requêtes (filtrage et sélection) dans le logiciel Microsoft Access, il est possible d'extraire les enregistrements correspondant à des critères précis et de les regrouper pour disposer de données de synthèse.

Les résultats peuvent être combinés dans de nouveaux tableaux et liés aux objets graphiques. La jonction entre l'objet graphique et les données attributaires est réalisée par sélection dans Mapinfo, et les traitements cartographiques sont également réalisés dans ce logiciel.

Parmi les deux grands types de traitements utilisés, des requêtes permettent de restituer les informations d'une date donnée.

Le schéma ci-après représente la table des objets avec leur évolution dans le temps ; le losange représente un relevé, c'est à dire un enregistrement daté et renseigné. T1 à T4 représentent les dates de passage sur la zone d'étude.



Il est donc possible de connaître la situation du peuplement à l'instant Q .

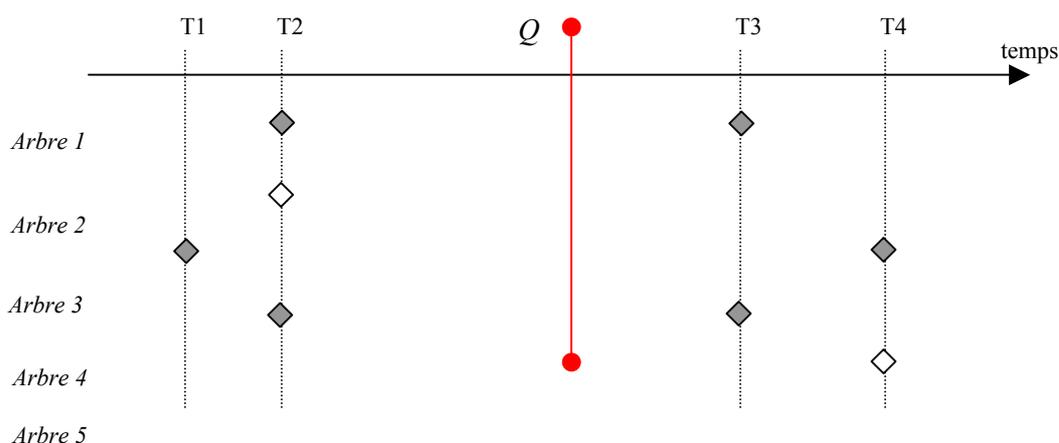
La Table « OBJET » contient toutes les formes prises par tous les individus sur la durée du suivi. Elle contient donc des éléments qui n'existaient pas encore (*arbre 5*), et des éléments qui ont existé mais ont disparu (*arbre 2*). Ces éléments doivent donc être exclus du lot de données à l'instant Q .

Seront donc retenus comme enregistrements :

- les objets dont la date d'apparition est avant Q et la date de disparition après Q (*arbre 1*)
- les objets dont la date d'apparition est avant Q et la date de disparition est vide (*arbres 3 et 4*).

Après que les arbres présents dans le peuplement à l'instant Q aient été retenus, il faut ensuite leur associer les informations issues des relevés thématiques, qui peuvent avoir été réalisés à d'autres dates. La dernière information connue pour chacune des thématiques sera donc retenue.

Illustration avec les relevés de champignons :



Les losanges représentent les relevés de la présence de champignons (table « releve_fungi »).

Les enregistrements relatifs aux arbres qui n'existaient pas (arbres 2 et 5) seront exclus d'emblée du traitement. Pour les autres, le relevé à prendre en compte est le dernier réalisé : à T1 pour l'arbre 3, à T2 pour les arbres 1 et 4.

L'opération est la même pour chaque type de relevé (dendrométrie, champignons, cavités, lichens, lierre, état sanitaire). Après cette série de manipulations, il est possible d'obtenir une photographie du peuplement à l'instant Q, cartographiable en liant la table obtenue avec les couches d'objets Mapinfo.

Ces traitements atteignent une certaine limite, directement liée à la fréquence des relevés : Si le délai est trop grand entre T1 et Q, l'information peut être obsolète. De plus, la date de relevé d'un phénomène (date de terrain) ne correspond pas forcément à la date d'apparition du phénomène. Un champignon apparu en T3 peut-être déjà présent à la date Q d'où l'importance d'avoir un protocole de relevés adaptés aux paramètres suivis.

Recherche d'un paramètre.

Ce type de requête est construit de façon assez simple. Par requête sur un champ particulier, la liste des arbres présentant ce caractère peut être facilement obtenue par sélection (par exemple, la recherche de la présence du champignon lignicole *Fomes fomentarius*).

Les requêtes de ce type peuvent combiner des critères issus de différentes thématiques : arbres « chandelier » de telle « espèce » avec tel « champignon ».

Les traitements mis en œuvre.

Ils ont été répétés à l'identique sur les deux jeux de données disponibles (réserve intégrale et ripisylve), traités indépendamment l'un de l'autre.

Les traitements n'ont porté que sur les arbres sur pied.

Pour mesurer l'impact de la conjonction canicule/sécheresse, l'étude s'appuie sur la connaissance de l'état initial du peuplement, c'est à dire avant l'été 2003. Ce traitement est un instantané obtenu selon la méthode exposée ci-dessus, listant tous les paramètres connus sur chaque arbre.

Par requêtes sur critères dendrométriques, les arbres qui sont morts depuis cet épisode ont été extraits : le tableau est fourni sous forme annualisée. Des requêtes similaires ont été mises en place pour suivre l'évolution d'un certain nombre de phénomènes : apparition de champignons, dessèchement du feuillage.

De ces arbres, ont donc été exclus également un certain nombre d'arbustes et les plantules (individus de hauteur inférieure à 30 cm). Au final, la base statistique retenue compte 17 720 individus pour la réserve intégrale et 11 804 pour la ripisylve.

Les traitements ont ensuite pu être réalisés par comparaison des différentes colonnes (phénomène daté) et exportés pour une visualisation cartographique dans le logiciel Mapinfo.

Investissement en temps

| | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cartographie Réserve Intégrale | 352 j | | | | | | | |
| Champignons Réserve intégrale | | | | 2 j | | | | |
| Cartographie Ripisylve | | | | | 83 j | | | |
| Mortalité, champignons | | | | | | 14 j | | |
| Mortalité, dessèchement, champignons | | | | | | | 29 j | |
| Mortalité, dessèchement, champignons | | | | | | | | 17 j |
| Développement Base de données | | | | | | | 40 j | |
| Premier traitement des données | | | | | | | 60 j | |

De juillet 1998 à octobre 2000, 352 journées (mise en place des quadrats et relevés de terrain, saisie informatique, corrections et ajouts) avaient été nécessaires à l'inventaire cartographique exhaustif de la réserve intégrale. En automne 2001, 2 journées avaient été consacrées aux relevés de champignons.

De juin 2002 à novembre 2002, l'inventaire cartographique exhaustif de la ripisylve avait requis 83 journées (mise en place des transects, relevés de terrain, saisie informatique, corrections et ajouts, programmation de l'interface de saisie).

Ces inventaires ont permis de dresser un état initial pour 2002 des peuplements forestiers étudiés.

En automne 2003, les cas de mortalité et les champignons lignicoles ont été inventoriés lors de 10 journées de terrain auxquelles il faut ajouter 4 journées de saisie.

Du début de l'été suivant à l'automne, ces inventaires ont été reconduits. En plus des champignons lignicoles et des nouveaux cas de mortalité, un autre paramètre est venu enrichir la base de donnée. Les signes de dépérissement pouvant être attribués à la conjonction sécheresse/canicule de l'été 2003 tels que les récentes descentes de cimes ou le dessèchement prématuré de tout ou partie du feuillage ont été ainsi relevés. 24 journées de terrain ont été nécessaires ainsi que 5 journées de saisie informatique.

Enfin, l'ensemble des arbres suivis a été contrôlé une nouvelle fois pendant l'été 2005. L'inventaire des nouveaux cas de mortalité et de dépérissement a cette fois requis 6 journées de terrain et 4 nouvelles journées de saisie auxquelles il faut ajouter 5 journées de terrain pour les relevés de champignons lignicoles qui ont été suivis de 2 journées de saisie informatique.

40 journées ont été nécessaires au développement de la base de données ainsi que 60 journées pour le traitement des données.

3 – Premier bilan des effets de la sécheresse/canicule 2003 sur le peuplement forestier

Les résultats seront présentés séparément car les deux zones étudiées, la réserve intégrale et la ripisylve ne sont pas soumises aux mêmes contraintes. La réserve intégrale délimitée par une clôture électrique échappe à l'influence du troupeau de bovins depuis 1998 tandis que cette pression s'exerce toujours le long de la ripisylve. Cette étroite forêt rivulaire est représentative du peuplement de la Massane en prenant en compte le gradient altitudinal sur un linéaire de 5 km (de 610 m à la *Font dels alemanys* à 970 m à la *Font de la Maçana*). Par contre, contrairement à la réserve intégrale, ce peuplement est soumis pour partie, au régime hydrologique de la rivière Massane.

30 espèces sont représentées sur les 32 que comptent la réserve naturelle. *Ulmus minor* et *Juglans regia* (introduit) sont absents des portions de peuplement étudiées.

| | |
|----------------------------|-----------------------------|
| <i>Acer campestre</i> | <i>Populus tremula</i> |
| <i>Acer monspessulanum</i> | <i>Prunus avium</i> |
| <i>Acer opalus</i> | <i>Prunus spinosa</i> |
| <i>Alnus glutinosa</i> | <i>Pyrus amygdaliformis</i> |
| <i>Arbustus unedo</i> | <i>Quercus humilis</i> |
| <i>Castanea sativa</i> | <i>Quercus ilex</i> |
| <i>Corylus avellana</i> | <i>Salix acuminata</i> |
| <i>Crataegus monogyna</i> | <i>Salix alba</i> |
| <i>Evonymus europaeus</i> | <i>Salix purpurea</i> |
| <i>Fagus sylvatica</i> | <i>Sambucus nigra</i> |
| <i>Fraxinus excelsior</i> | <i>Sorbus aria</i> |
| <i>Ilex aquifolium</i> | <i>Sorbus domestica</i> |
| <i>Phyllirea latifolia</i> | <i>Sorbus torminalis</i> |
| <i>Pinus nigra</i> | <i>Taxus baccata</i> |
| <i>Populus nigra</i> | <i>Tilia platyphyllos</i> |

3.1 – Cas de mortalité

3.1.1. la réserve intégrale

| Espèces | Effectifs | Mort 2003 | Mort 2004 | Mort 2005 | Total cas de mortalité | % mortalité |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|-------------|
| <i>Acer campestre</i> | 11 | | | | | |
| <i>Acer monspessulanum</i> | 237 | | | 3 | 3 | 1,27 |
| <i>Acer opalus</i> | 7 | | | | | |
| <i>Alnus glutinosa</i> | 3 | | | | | |
| <i>Arbustus unedo</i> | 2 | | | | | |
| <i>Corylus avellana</i> | 53 | | | | | |
| <i>Crataegus monogyna</i> | 6 | | | | | |
| <i>Evonymus europaeus</i> | 69 | | | | | |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 8068 | 99 | 196 | 128 | 423 | 5,24 |
| <i>Fraxinus excelsior</i> | 29 | | | | | |
| <i>Ilex aquifolium</i> | 5939 | 1 | 7 | 5 | 13 | 0,22 |
| <i>Phyllirea latifolia</i> | 1 | | | | | |
| <i>Pinus nigra</i> | 127 | | 2 | 1 | 3 | 2,36 |
| <i>Prunus avium</i> | 30 | | | | | |
| <i>Prunus spinosa</i> | 33 | | | | | |
| <i>Quercus humilis</i> | 1733 | 2 | 18 | 16 | 36 | 2,08 |
| <i>Quercus ilex</i> | 949 | | 3 | 6 | 9 | 0,95 |
| <i>Sambucus nigra</i> | 1 | | | | | |
| <i>Sorbus aria</i> | 393 | | 5 | 1 | 6 | 1,53 |
| <i>Sorbus domestica</i> | 1 | | | | | |
| <i>Sorbus torminalis</i> | 1 | | | | | |
| <i>Taxus baccata</i> | 26 | | | | | |
| <i>Tilia platyphyllos</i> | 1 | | | | | |
| | | | | | | |
| Total | 17720 | 102 | 231 | 160 | 493 | 2,78 |

Parmi les cas de mortalité recensés dans la réserve intégrale, 102 ont été notés en automne 2003 touchant tout particulièrement le hêtre *Fagus sylvatica* (99 individus) et sont certainement la conséquence de la conjonction sécheresse/canicule de l'été 2003. Au moment du relevé, la mort de la plupart d'entre eux semblait très récente mais il n'est malheureusement pas possible d'affirmer que la totalité de ces individus ait succombé à l'été 2003 car depuis le mois de novembre 2002, aucun relevé n'avait été réalisé dans la réserve intégrale.

En revanche, 231 nouveaux cas de mortalité ont été recensés lors des journées de terrain conduites en été 2004. Ces arbres étaient toujours vivants les deux mois qui ont suivis le violent épisode climatique estival de 2003. Pour ces derniers, il y a beaucoup moins de doutes que les contraintes, hydrique et thermique, de l'été soient la cause déterminante expliquant leur mortalité.

Les 160 nouveaux cas de mortalité notés lors des journées de terrain de l'été 2005 sont certainement la conséquence des effets différés de la conjonction sécheresse/canicule de 2003.

493 cas de mortalité ont été notés dans la réserve intégrale depuis l'exceptionnel épisode climatique de l'été 2003 soit 2,78% des effectifs suivis. L'impact des stress, hydrique et thermique, sur le peuplement semble d'autant plus significatif que seulement 76 arbres présentaient un signe d'affaiblissement visible antérieur à l'été 2003 : 64 individus

présentaient une cavité, 9 au moins un sporophore de champignon lignicole et 3 à la fois une cavité et au moins un sporophore de champignon lignicole.

3.1.2. la ripisylve

| Espèces | effectifs | mort 2003 | mort 2004 | mort 2005 | Total cas de mortalité | % mortalité |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|-------------|
| <i>Acer campestre</i> | 95 | | | | | |
| <i>Acer monspessulanum</i> | 331 | 2 | 3 | 3 | 8 | 2,42 |
| <i>Acer opalus</i> | 36 | | 1 | | 1 | 2,78 |
| <i>Alnus glutinosa</i> | 483 | 18 | 27 | 17 | 62 | 12,63 |
| <i>Castanea sativa</i> | 12 | | | | | |
| <i>Corylus avellana</i> | 103 | | 1 | | 1 | 0,97 |
| <i>Crataegus monogyna</i> | 242 | | | 1 | 1 | 0,41 |
| <i>Evonymus europaeus</i> | 64 | | | 1 | 1 | 1,56 |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 5616 | 30 | 72 | 41 | 143 | 2,55 |
| <i>Fraxinus excelsior</i> | 272 | 1 | 5 | 3 | 9 | 3,31 |
| <i>Ilex aquifolium</i> | 3649 | 1 | 13 | 17 | 31 | 0,85 |
| <i>Phyllirea latifolia</i> | 5 | | | | | |
| <i>Pinus nigra</i> | 1 | | | | | |
| <i>Populus nigra</i> | 1 | | | | | |
| <i>Populus tremula</i> | 4 | | | 1 | 1 | 25,00 |
| <i>Prunus avium</i> | 27 | | | 3 | 3 | 11,11 |
| <i>Prunus spinosa</i> | 344 | | | | | |
| <i>Pyrus amygdaliformis</i> | 8 | | | | | |
| <i>Quercus humilis</i> | 199 | 1 | 4 | 3 | 8 | 4,02 |
| <i>Quercus ilex</i> | 103 | | | | | |
| <i>Salix acuminata</i> | 33 | | | | | |
| <i>Salix alba</i> | 1 | | | | | |
| <i>Salix purpurea</i> | 2 | | | | | |
| <i>Sambucus nigra</i> | 50 | | | | | |
| <i>Sorbus aria</i> | 107 | | 5 | 2 | 7 | 6,54 |
| <i>Sorbus torminalis</i> | 2 | | | | | |
| <i>Taxus baccata</i> | 5 | 1 | 0 | | 1 | 20,00 |
| <i>Tilia platyphyllos</i> | 9 | | | | | |
| | | | | | | |
| Total | 11804 | 54 | 131 | 92 | 277 | 2,34 |

54 cas de mortalité ont été recensés en septembre 2003. Comme pour la réserve intégrale, aucun relevé n'avait été réalisé depuis novembre 2002. Il est donc probable que certains de ces cas soient antérieurs à l'été 2003. Cependant, la plupart des morts enregistrées lors des journées de terrain de septembre 2003 semblaient très récentes et sont très probablement la conséquence directe des stress, hydrique et thermique, subis par les peuplements pendant l'été 2003.

Dix mois après la fin de l'exceptionnel épisode climatique, 131 nouveaux cas de mortalité étaient relevés. La mortalité due aux stress, hydrique et thermique, de l'été 2003 semble significative sur le Hêtre *Fagus sylvatica* et plus encore sur l'aulne glutineux *Alnus glutinosa*. En 2005, 92 nouveaux cas de mortalité ont été recensés lors des journées de terrain et sont certainement la conséquence des effets différés du violent épisode climatique.

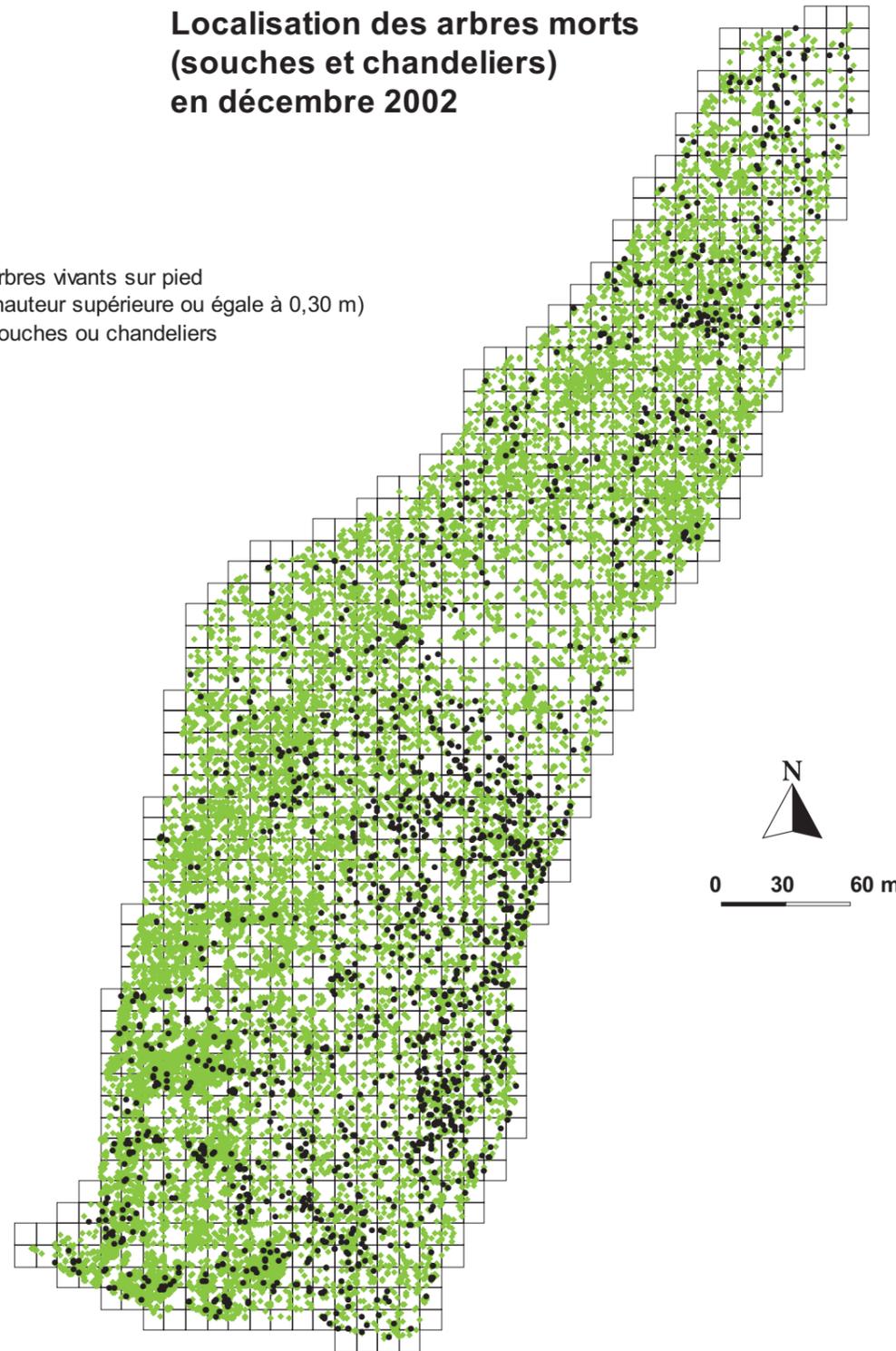
Le long de la ripisylve, au total 277 individus semblent avoir succombé aux contraintes, hydrique et thermique, de l'été 2003. 45 d'entre eux présentaient un signe d'affaiblissement visible antérieur au violent épisode climatique : 15 arbres présentant au

Suivi des effets de la conjonction sécheresse/canicule de 2003 dans la forêt de la Massane :

mortalité dans la réserve intégrale

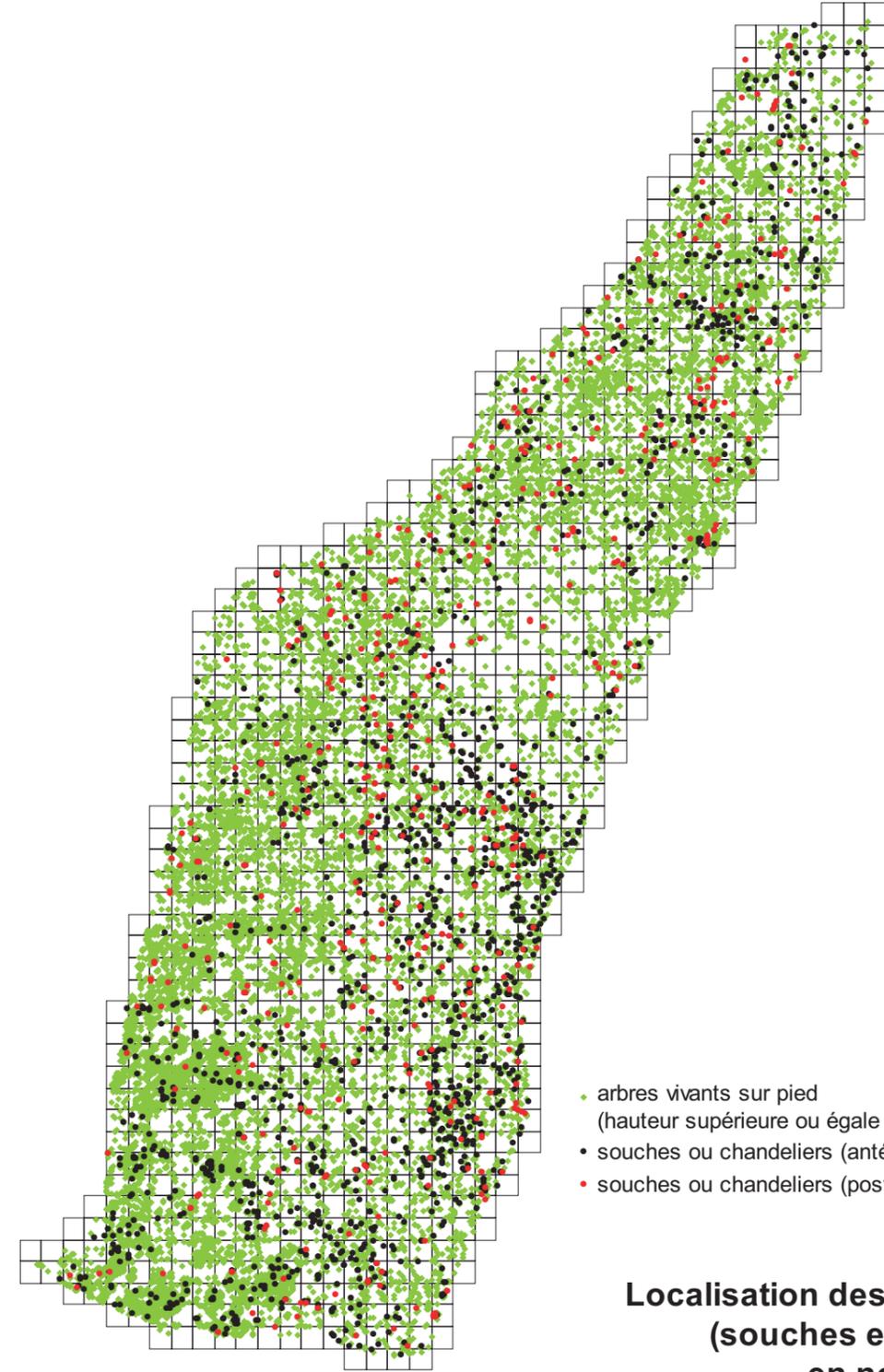
**Localisation des arbres morts
(souches et chandeliers)
en décembre 2002**

- arbres vivants sur pied
(hauteur supérieure ou égale à 0,30 m)
- souches ou chandeliers



- arbres vivants sur pied
(hauteur supérieure ou égale à 0,30 m)
- souches ou chandeliers (antérieurs à l'été 2003)
- souches ou chandeliers (postérieurs à l'été 2003)

**Localisation des arbres morts
(souches et chandeliers)
en novembre 2005**



moins une cavité, 28 présentant au minimum un sporophore de champignon lignicole et 2 présentant à la fois au moins un champignon lignicole et une cavité. Comme pour la réserve intégrale, près de 85% des arbres morts ne présentaient pas de signe d'affaiblissement visible avant juillet 2003. Cela témoigne encore une fois de l'important impact des contraintes, hydrique et thermique, sur les peuplements forestiers.

3.1.3 - Synthèse des cas de mortalité

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des cas de mortalité relevés dans les deux portions de forêt étudiées. Sur les 29524 arbres suivis, 770 cas de mortalité ont été notés depuis l'exceptionnel épisode climatique de l'été 2003 soit 2,61%.

Sur les 30 espèces représentées, 16 sont concernées par des cas de mortalité.

| Espèces | Effectifs | mort 2003 | mort 2004 | mort 2005 | Total cas de mortalité | % mortalité |
|-----------------------------|--------------|------------|------------|------------|------------------------|-------------|
| <i>Acer campestre</i> | 106 | | | | | |
| <i>Acer monspessulanum</i> | 568 | 2 | 3 | 6 | 11 | 1,94 |
| <i>Acer opalus</i> | 43 | | 1 | | 1 | 2,33 |
| <i>Alnus glutinosa</i> | 486 | 18 | 27 | 17 | 62 | 12,76 |
| <i>Arbustus unedo</i> | 2 | | | | | |
| <i>Castanea sativa</i> | 12 | | | | | |
| <i>Corylus avellana</i> | 156 | | 1 | | 1 | 0,64 |
| <i>Crataegus monogyna</i> | 248 | | | 1 | 1 | 0,40 |
| <i>Evonymus europaeus</i> | 133 | | | 1 | 1 | 0,75 |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 13684 | 129 | 268 | 169 | 566 | 4,14 |
| <i>Fraxinus excelsior</i> | 301 | 1 | 5 | 3 | 9 | 2,99 |
| <i>Ilex aquifolium</i> | 9588 | 2 | 20 | 22 | 44 | 0,46 |
| <i>Phyllirea latifolia</i> | 6 | | | | | |
| <i>Pinus nigra</i> | 128 | | 2 | 1 | 3 | 2,34 |
| <i>Populus nigra</i> | 1 | | | | | |
| <i>Populus tremula</i> | 4 | | | 1 | 1 | 25,00 |
| <i>Prunus avium</i> | 57 | | | 3 | 3 | 5,26 |
| <i>Prunus spinosa</i> | 377 | | | | | |
| <i>Pyrus amygdaliformis</i> | 8 | | | | | |
| <i>Quercus humilis</i> | 1932 | 3 | 22 | 19 | 44 | 2,28 |
| <i>Quercus ilex</i> | 1052 | | 3 | 6 | 9 | 0,86 |
| <i>Salix acuminata</i> | 33 | | | | | |
| <i>Salix alba</i> | 1 | | | | | |
| <i>Salix purpurea</i> | 2 | | | | | |
| <i>Sambucus nigra</i> | 51 | | | | | |
| <i>Sorbus aria</i> | 500 | | 10 | 3 | 13 | 2,60 |
| <i>Sorbus domestica</i> | 1 | | | | | |
| <i>Sorbus torminalis</i> | 3 | | | | | |
| <i>Taxus baccata</i> | 31 | 1 | | | 1 | 3,23 |
| <i>Tilia platyphyllos</i> | 10 | | | | | |
| | | | | | | |
| Total | 29524 | 156 | 362 | 252 | 770 | 2,61 |

Deux ans après la fin de l'épisode de sécheresse combinée aux fortes températures, 770 cas de mortalité ont été recensés sur l'ensemble des arbres suivis soit 2,61% des effectifs.

Parmi les espèces représentées par des effectifs suffisamment nombreux pour faire ressortir une tendance, le hêtre *Fagus sylvatica*, la principale essence du peuplement, et le Chêne pubescent *Quercus humilis* ont été particulièrement touchés avec, respectivement, 4,14% et 2,28% des effectifs, qui ont succombé après l'été 2003. L'impact est encore plus important sur l'aulne glutineux dont la plupart des effectifs se trouvent dans la ripisylve. 12,76% de ses effectifs n'ont pas survécu sur la période considérée.

Les inventaires cartographiques initiaux ont été réalisés trop récemment. Il n'est donc pas possible de calculer un taux de mortalité annuel moyen. Quoi qu'il en soit, les arbres ont été sévèrement touchés par les stress, hydrique et thermique, de l'été 2003. Sur l'ensemble du peuplement étudié, en décembre 2002, la proportion d'arbres morts (souches et chandeliers) est de 9,4% alors qu'elle est de 11,9% en novembre 2005 soit une augmentation de 2,5 points. Cela démontre encore une fois l'impact de la perturbation climatique de l'été 2003 sur la forêt de la Massane.

3.2 – Cas de dépérissement

« Une augmentation des flux (et/ou des résistances) accompagnant la sécheresse provoque une augmentation des tensions sur les colonnes d'eau dans les tissus conducteurs. Au-delà d'un seuil, les tensions provoquent l'apparition de bulles d'air et l'embolie. Une embolie massive conduit à un brutal dessèchement de tout ou partie du feuillage voire des branches. Le seuil d'apparition de l'embolie est très variable suivant les essences et les organes : il permet de définir la vulnérabilité à l'embolie » (COCHARD, 2003).

Les descentes de cimes et les dessèchements prématurés de tout ou partie du feuillage ont été relevés et considérés comme des conséquences visibles des stress, hydrique et thermique, auxquels ont été soumis les arbres lors de l'épisode climatique de l'été 2003.

Ces résultats sont toutefois à prendre avec circonspection. En effet, avant l'été 2003, seuls les champignons lignicoles et les cavités avaient été relevés. Les autres signes de dépérissement n'avaient pas fait l'objet de la même attention. Il n'est alors pas possible de comparer les proportions d'arbres présentant de tels signes de dépérissement avant et après l'épisode climatique. Cependant, la quantité d'arbres présentant de tels signes avait interpellé le personnel de la Réserve Naturelle en révélant l'ampleur des conséquences d'un tel événement climatique.

3.2.1. Cas de dépérissement dans la réserve intégrale

| Espèces | Effectifs | dessèchement observé en 2004 | nouveau dessèchement observé en 2005 | dessèchement observé en 2004 et 2005 | dessèchement 2004 suivi de mort |
|----------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Acer campestre</i> | 11 | | | | |
| <i>Acer monspessulanum</i> | 237 | 9 | 1 | | |
| <i>Acer opalus</i> | 7 | | | | |
| <i>Alnus glutinosa</i> | 3 | | | | |
| <i>Arbustus unedo</i> | 2 | | | | |
| <i>Corylus avellana</i> | 53 | | | | |
| <i>Crataegus monogyna</i> | 6 | | | | |
| <i>Evonymus europaeus</i> | 69 | | | | |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 8068 | 1256 | 441 | 587 | 87 |
| <i>Fraxinus excelsior</i> | 29 | | | | |
| <i>Ilex aquifolium</i> | 5939 | 14 | 6 | 3 | 1 |
| <i>Phyllirea latifolia</i> | 1 | | | | |
| <i>Pinus nigra</i> | 127 | 2 | 1 | | 1 |
| <i>Prunus avium</i> | 30 | | | | |
| <i>Prunus spinosa</i> | 33 | | | | |
| <i>Quercus humilis</i> | 1733 | 71 | 14 | 11 | 8 |
| <i>Quercus ilex</i> | 949 | 31 | 1 | 5 | 6 |
| <i>Sambucus nigra</i> | 1 | | | | |
| <i>Sorbus aria</i> | 393 | 7 | | 1 | |
| <i>Sorbus domestica</i> | 1 | | | | |
| <i>Sorbus torminalis</i> | 1 | | | | |
| <i>Taxus baccata</i> | 26 | | 6 | | |
| <i>Tilia platyphyllos</i> | 1 | | 1 | | |
| | | | | | |
| Total | 17720 | 1390 | 471 | 607 | 103 |

Dans la réserve intégrale, 7,8 % des individus (1390 arbres) présentaient 10 mois après la fin de l'épisode de sécheresse/canicule de 2003 un dessèchement partiel prématuré du

feuillage. 91 de ces individus ont succombé dans l'année qui a suivi le premier contrôle alors que 607 autres individus continuaient à présenter ce symptôme. En 2005, 680 individus ne présentaient plus de dessèchement visible. En revanche, 471 nouveaux cas étaient relevés.

3.2.2. Cas de dépérissement dans la ripisylve

| Espèces | effectifs | dessèchement observé en 2004 | nouveau dessèchement observé en 2005 | dessèchement observé en 2004 et en 2005 | dessèchement en 2004 suivi de mort |
|-----------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| <i>Acer campestre</i> | 95 | 2 | 1 | 1 | |
| <i>Acer monspessulanum</i> | 331 | 9 | 10 | | 6 |
| <i>Acer opalus</i> | 36 | 3 | | 1 | 1 |
| <i>Alnus glutinosa</i> | 483 | 50 | 16 | 11 | 15 |
| <i>Castanea sativa</i> | 12 | 1 | | | |
| <i>Corylus avellana</i> | 103 | 7 | | | |
| <i>Crataegus monogyna</i> | 242 | 3 | | | |
| <i>Evonymus europaeus</i> | 64 | | | | |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 5616 | 354 | 168 | 202 | 22 |
| <i>Fraxinus excelsior</i> | 272 | 6 | 1 | | 3 |
| <i>Ilex aquifolium</i> | 3649 | 27 | 11 | 1 | 5 |
| <i>Phyllirea latifolia</i> | 5 | | | | |
| <i>Pinus nigra</i> | 1 | | | | |
| <i>Populus nigra</i> | 1 | | | | |
| <i>Populus tremula</i> | 4 | 1 | | | |
| <i>Prunus avium</i> | 27 | 3 | 2 | | |
| <i>Prunus spinosa</i> | 344 | | | | |
| <i>Pyrus amygdaliformis</i> | 8 | | | | |
| <i>Quercus humilis</i> | 199 | 15 | 2 | 4 | 2 |
| <i>Quercus ilex</i> | 103 | | | | |
| <i>Salix acuminata</i> | 33 | | 1 | | |
| <i>Salix alba</i> | 1 | | | | |
| <i>Salix purpurea</i> | 2 | | | | |
| <i>Sambucus nigra</i> | 50 | | | | |
| <i>Sorbus aria</i> | 107 | 2 | 2 | | |
| <i>Sorbus torminalis</i> | 2 | | | | |
| <i>Taxus baccata</i> | 5 | | 2 | | |
| <i>Tilia platyphyllos</i> | 9 | 1 | 1 | 1 | |
| | | | | | |
| Total | 11804 | 484 | 217 | 221 | 54 |

4,1% (484 individus) des arbres suivis le long de la ripisylve présentaient 10 mois après la fin de l'épisode de sécheresse/canicule un dessèchement partiel prématuré du feuillage. 54 d'entre eux n'ont pas survécu et ce symptôme était toujours visible sur 221 individus lors des relevés de l'été 2005.

A cette période, ces dessèchements n'étaient plus visibles sur 209 individus. En revanche, 217 nouveaux cas étaient relevés.

3.2.3 - Bilan des cas de dépérissement

Alnus glutinosa et *Fagus sylvatica* présentent les plus grosses proportions d'arbres présentant un dessèchement prématuré du feuillage du moins sur un nombre d'effectif suffisamment important.

Dans la réserve intégrale, les hêtres sont de loin les arbres les plus touchés par ce symptôme : 15,5% des effectifs. Dans la ripisylve, ils ne sont que 6,3%. En revanche, l'aulne glutineux avec 10,3% d'individus touchés est l'espèce qui a le plus mal supporté les

contraintes climatiques de 2003 du moins pour le peuplement rivulaire. Comme pour les cas de mortalité, le violent épisode hydrologique qui avait précédé de cinq ans la sécheresse/canicule est certainement aussi l'une des causes de l'important dépérissement observé sur le peuplement d'aulnes.

Un rapport publié par le Département Santé des Forêts en février 2004 (DSF, février 2004) mettait en garde les observateurs quant aux interprétations hâtives concernant les réactions du hêtre face à un tel épisode climatique. « *Comme pour le chêne pubescent, une importante réactivité du hêtre en terme de symptômes foliaires visuels consécutivement au stress climatique de l'été 2003. En 2004 le suivi réalisé sur les placettes du réseau européen et du réseau complémentaire, leur permet de dire qu'il paraît « complètement illusoire de vouloir établir un diagnostic sanitaire pertinent pour le hêtre au vu des premiers symptômes foliaires* » (PAULY et BELROSE, 2005). Pour cette espèce, l'impact visuel est fort mais ne préjuge en rien du niveau du déficit foliaire l'année suivante. Les dessèchements prématurés du feuillage ont été relevés dans le cadre de l'étude réalisée dans la forêt de la Massane sans tenir compte de la proportion de feuillage desséché. De nombreux doutes avaient été émis quant à la pertinence d'un tel paramètre et vu la quantité de hêtres présentant un tel symptôme. A la Massane, dès la mi-août 2003, l'ensemble des hêtres présentaient des couleurs automnales et des anomalies de feuillages (brunissement, flétrissement, etc.) et il a fallu attendre 2004 pour établir un premier diagnostic sanitaire.

L'inventaire des effets de la sécheresse/canicule reconduit en 2005 apporte cependant quelques précisions sur les conséquences de ce type d'impact. Par exemple, sur l'ensemble des deux zones étudiées, 7,7% des arbres présentant un tel symptôme lors des relevés en 2004 sont morts dans le courant de l'année qui a suivi. 44% présentaient à nouveau un dessèchement partiel prématuré du feuillage l'année suivante pendant la saison de végétation 2005.

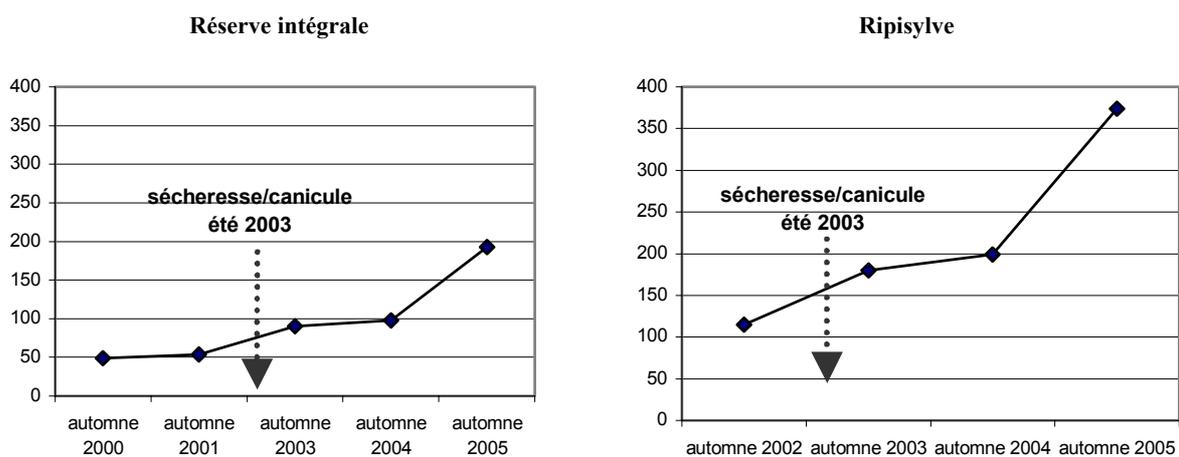
3.3 – Vulnérabilité aux parasites : le cas des champignons lignicoles

Le nombre d'espèces de champignons pouvant affecter les arbres est très important et « on estime à quelques milliers le nombre d'espèces fongiques saproxyliques. A l'échelle locale, plusieurs centaines d'espèces peuvent cohabiter, au sein d'assemblages d'une remarquable richesse. Dans les forêts tempérées, le hêtre accueille les mycomycénoses les plus diversifiées... » « Au-delà de leur richesse, les communautés saproxyliques se caractérisent par une proportion élevée d'espèces faiblement représentées (localement rares en terme de fructification) » (RICHARD et al., 2005).

Bien que présentant une grande diversité d'espèces, à la Massane seules quelques espèces ont fait l'objet de relevés antérieurs et postérieurs à l'épisode 2003 : *Armillaria mellea* Vahl., *Fomes fomentarius* L., *Hericium clathroides* (Pall.), *Hypholoma* sp., *Oudemansiella mucida* Jacq., *Pleurotus ostreatus* Jacq., *Laetiporus sulfureus* (Bull.), *Ganoderma* sp., *Inonotus radiatus*, *Gymnopilus spectabilis*, *Pholiota alnicola*, *Meripilus giganteus*. Ces espèces ont été choisies parmi celles que l'on observe, le plus fréquemment sur les arbres à la Massane, leur relative facilité d'identification, et permettant donc des observations reproductibles. D'autres espèces, dont les fructifications sont discrètes, ou rares, peuvent avoir un impact bien plus grand sur la santé des arbres, mais ne peuvent être observées avec la même précision.

« L'expérience a révélé que certaines espèces ne fructifiaient que pendant un assez court laps de temps. D'autres espèces qui ne fructifient pas ou très peu, peuvent jouer un rôle important sur la santé des arbres. Comme le démontrent des travaux récents » (RICHARD et al., 2004) qui excluent cependant les champignons décomposeurs de bois, la diversité et l'importance des champignons ne peuvent être appréhendées qu'à partir de l'analyse des mycorhizes et des fructifications. Dans leurs travaux, sur 260 espèces répertoriées, 166 seulement l'ont été à partir des fructifications.

Ce travail est donc loin d'être exhaustif de l'impact des champignons sur la santé des arbres, mais permet de suivre l'évolution des espèces retenues, et le nombre d'arbres touchés par ces espèces.



Arbres vivants avec présence de champignons lignicoles

Depuis la fin de l'épisode climatique exceptionnel de 2003, le nombre d'arbres vivants porteurs d'au moins un champignon lignicole a triplé. Ils étaient 54 dans la réserve intégrale et 115 dans la ripisylve lors des relevés antérieurs à l'été 2003. La réserve intégrale en compte aujourd'hui 193 et la ripisylve 374. Cette présence accrue de champignons lignicoles est certainement une conséquence de la conjonction sécheresse/canicule de 2003 et des stress, hydrique et thermique, rendant les arbres plus vulnérables aux parasites.

3.3.1 – Les cas de *Fomes fomentarius*, *Oudemansiella mucida* et *Inonotus radiatus*

Certaines espèces peuvent être étudiées très précisément du fait de la phénologie précise et saisonnière des sorties de sporophores. C'est pour ces raisons qu'*Oudemansiella mucida* a été retenue pour cette analyse car ne fructifiant à la Massane qu'en automne, et que *Pleurotus ostreatus* a été écartée car fructifiant sur une grande partie de l'année, du printemps à l'automne et ne répondant donc pas à un suivi exhaustif.

D'autres espèces peuvent faire l'objet d'analyse précise de part le caractère pérenne des sporophores. C'est le cas de l'Amadouvier *Fomes fomentarius*, mais aussi d'*Inonotus radiatus* sur les Aulnes, mais aussi de *Meripilus giganteus* et *Laetiporus sulfureus*. Nous n'avons retenu pour l'analyse que *F. fomentarius* et *I. radiatus* car présents sur de nombreux arbres.

Fomes fomentarius

De décembre 2002 à décembre 2005, le nombre d'individus (vivants, souches ou chandeliers) porteurs de *Fomes fomentarius* est passé de 65 à 97 dans la réserve intégrale et de 89 à 125 dans la ripisylve (cf. carte jointe). La fructification de cette espèce ne semble pas être conditionnée par la pluie car les nouveaux sporophores apparaissent en plein cœur de l'été, fin août en pleine chaleur et sécheresse.

Oudemansiella mucida

L'augmentation est beaucoup plus importante que pour les amadouviens. De la fin de l'épisode climatique à novembre 2005, leur nombre n'a cessé de croître dans la réserve intégrale passant de 54 à 189 alors que dans la ripisylve, de décembre 2002 à décembre 2005, le nombre d'arbres porteurs de ce champignon est passé de 16 à 318 (cf. carte jointe).

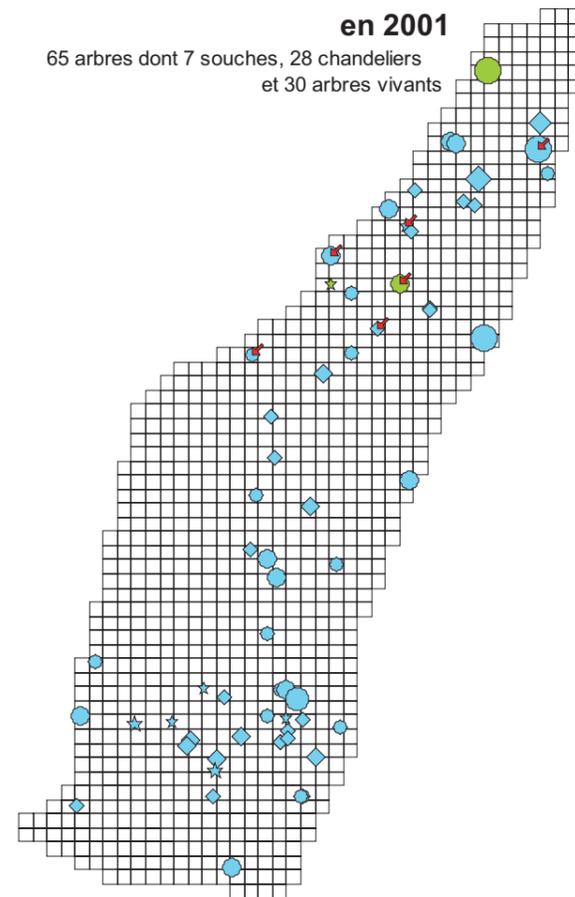
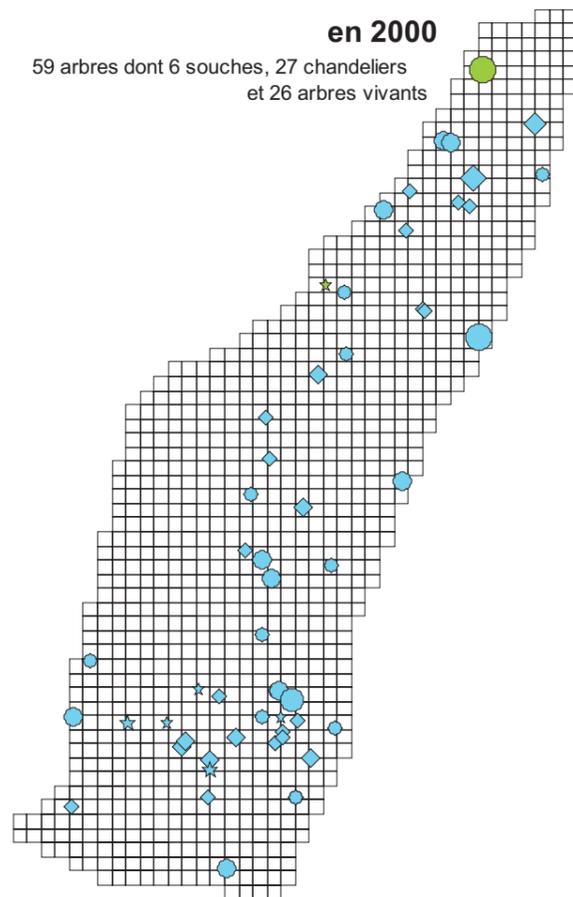
De nombreuses fructifications de champignons sont en grande partie tributaire de la quantité d'eau disponible et il est vraisemblable que les sorties d'*O. mucida* observées durant l'automne 2005 aient fortement été conditionnées par les 400 mm de pluie tombés en octobre. L'impact de la conjonction canicule/sécheresse est donc à relativiser pour cette espèce.

Inonotus radiatus

Les effectifs de *Inonotus radiatus* a régulièrement augmenté depuis décembre 2002 passant de 52 arbres touchés à 75. En revanche, dans ce même intervalle de temps, le nombre d'arbres vivants présentant un sporophore a diminué passant de 26 à 21 car pour 5 aulnes, la présence révélée du champignon a précédé la mort de l'arbre (cf. carte jointe).

Ce champignon est l'espèce la plus fréquemment observée sur les aulnes dépérissant ou morts à la Massane.

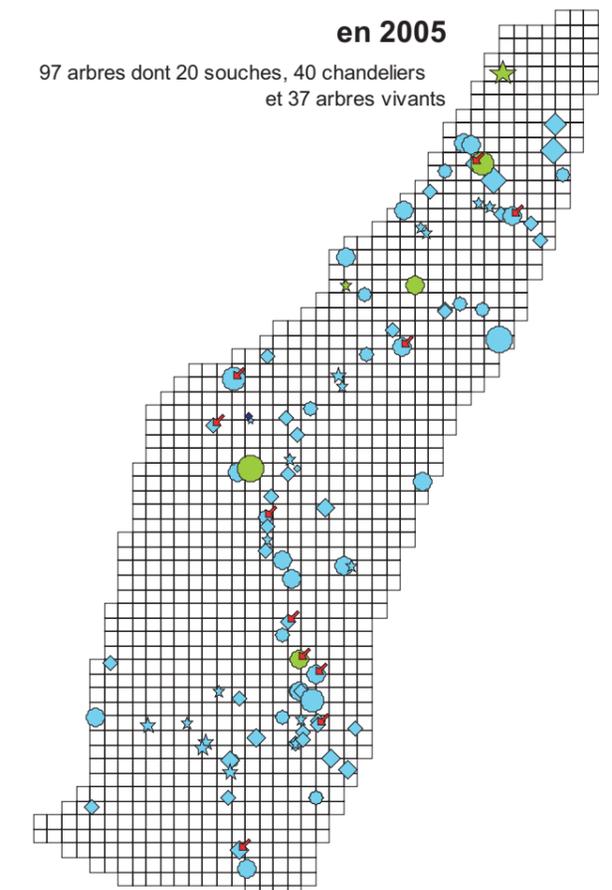
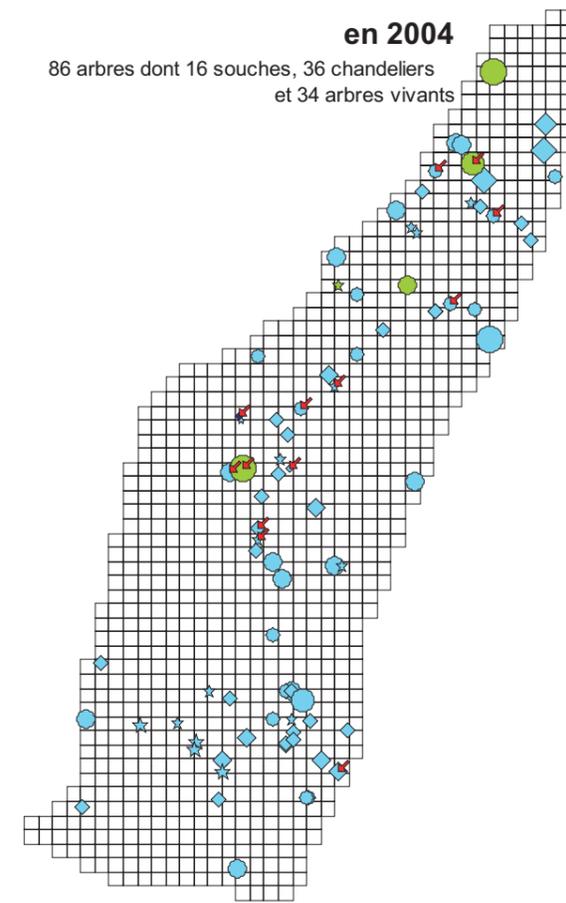
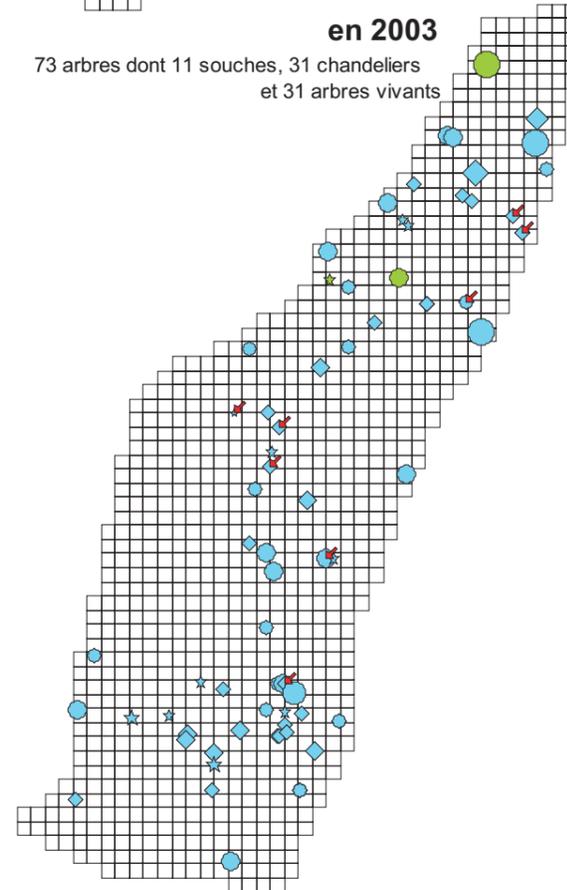
Arbres présentant au moins un sporophore d' Amadouvier *Fomes fomentarius* dans la réserve intégrale



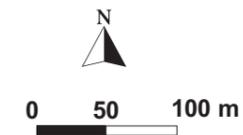
Avant la conjonction sécheresse/canicule de 2003...



L'Amadouvier *Fomes fomentarius*



- | Espèces | Classes de diamètre | |
|--|---------------------|--|
| ■ <i>Quercus humilis</i> | ○ 70 - 150 | ● arbres vivants sur pied |
| ■ <i>Fagus sylvatica</i> | ○ 50 - 70 | ★ souches |
| ■ <i>Ilex aquifolium</i> | ○ 30 - 50 | ◆ chandeliers |
| | ○ 10 - 30 | ➤ <i>Fomes fomentarius</i> apparu dans l'année |
| | ○ 1 - 10 | |

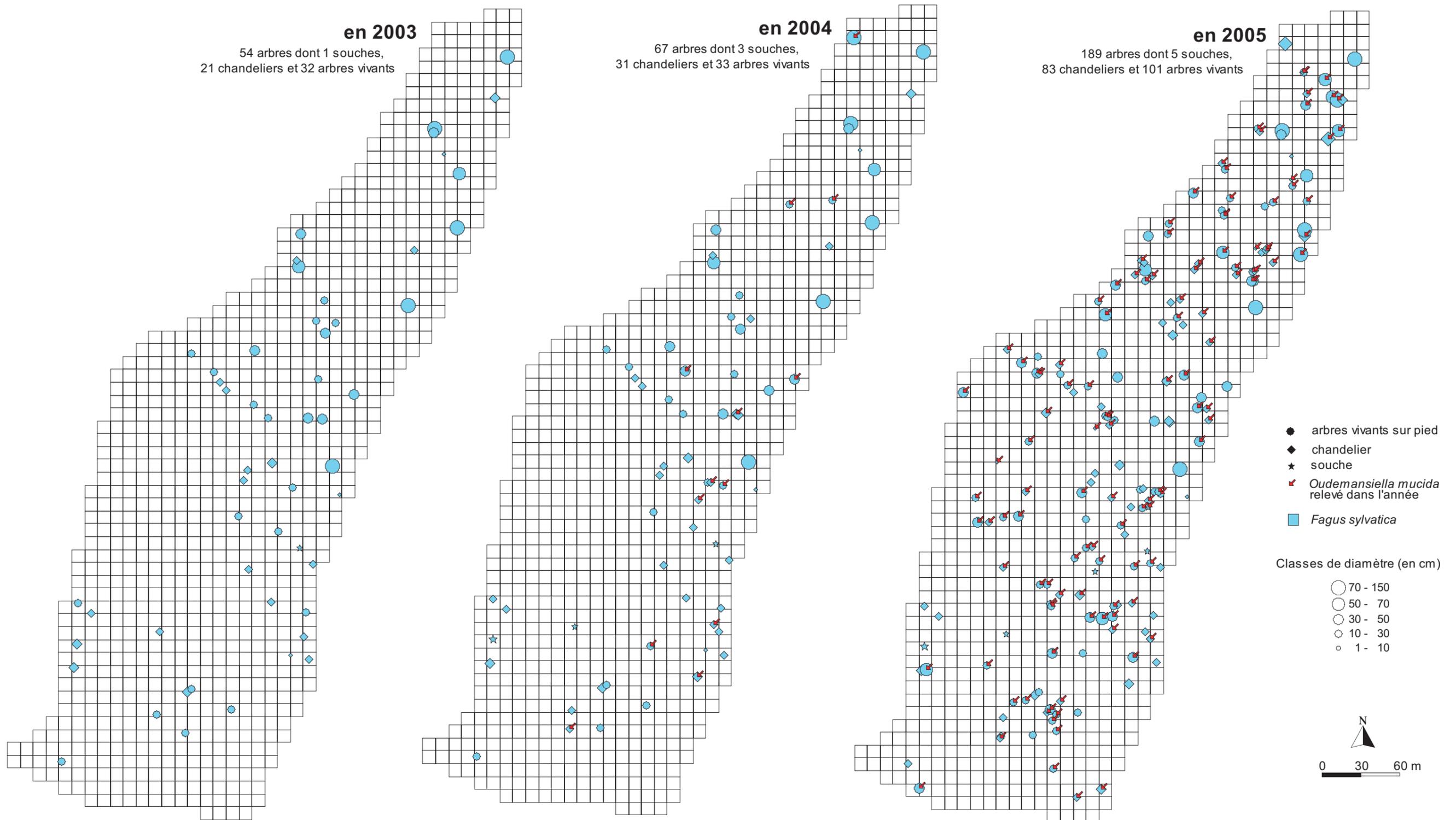


Après la conjonction sécheresse/canicule de 2003...



Oudemansiella mucida
sur tronc de Hêtre

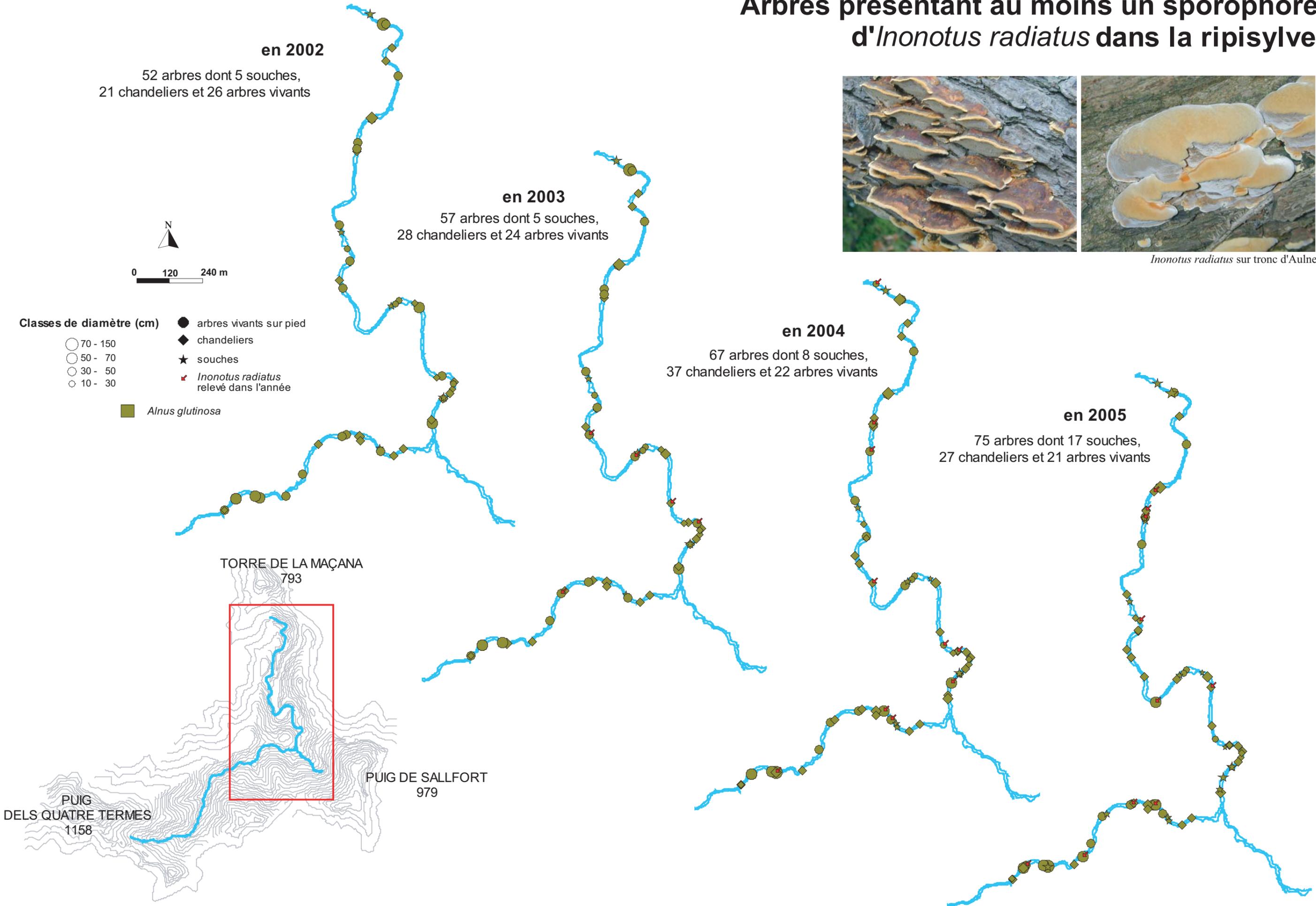
Arbres présentant au moins un sporophore de *Oudemansiella mucida* dans la réserve intégrale



Arbres présentant au moins un sporophore d'*Inonotus radiatus* dans la ripisylve



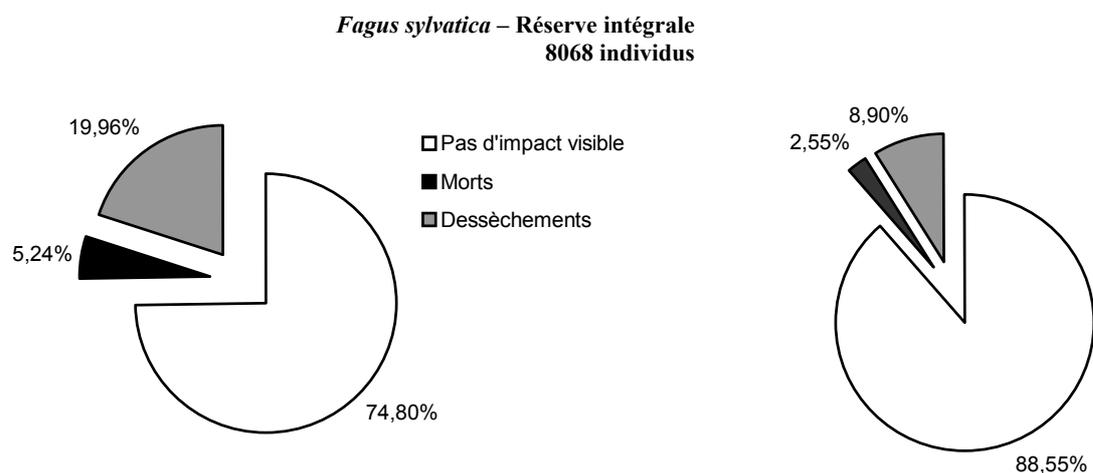
Inonotus radiatus sur tronc d'Aulne



3.4 - Situation par espèces

Le hêtre *Fagus sylvatica*, le chêne pubescent *Quercus humilis* et l'aulne glutineux *Alnus glutinosa* sont particulièrement touchés. Ces trois espèces font l'objet d'une analyse plus approfondie.

3.4.1. – le hêtre *Fagus sylvatica*



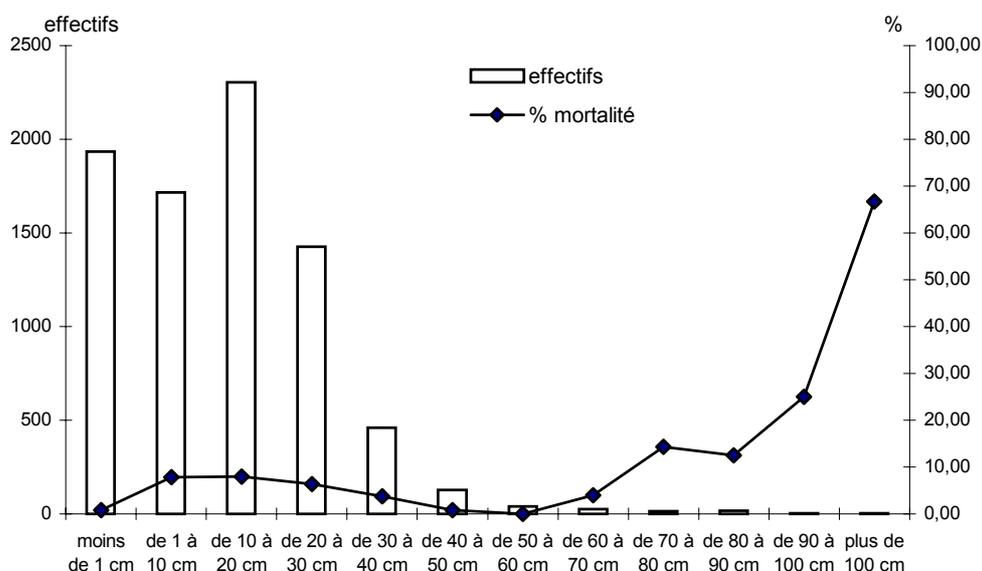
Conséquences des stress, hydrique et thermique, de l'été 2003

***Fagus sylvatica* – Ripisylve
5616 individus**

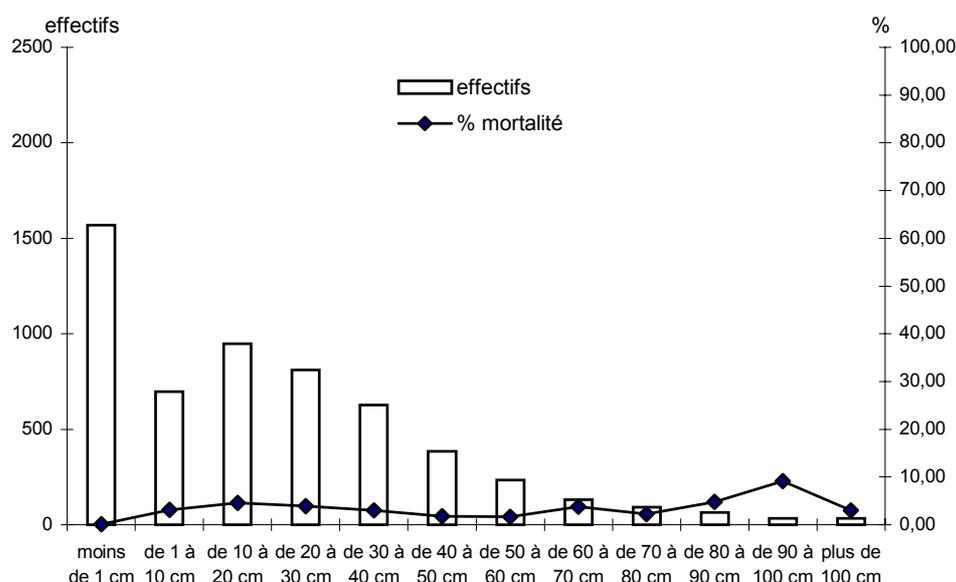
Le dépérissement du hêtre consécutivement aux contraintes, hydriques et thermiques, de l'été 2003 est deux fois plus important dans la réserve intégrale que dans la ripisylve.

Dans la réserve intégrale, seulement 15% des cas de mortalité touchant le hêtre concernent des individus qui présentaient un signe visible d'affaiblissement antérieur à l'été 2003. En effet, sur les 423 cas de mortalité, 63 individus présentaient soit une cavité (53), soit au moins un sporophore de champignon lignicole (8), soit à la fois l'un et l'autre (2).

En revanche, le long de la ripisylve, plus d'un quart des cas de mortalité enregistrés chez le hêtre présentaient des signes d'affaiblissement visibles antérieurs à l'épisode caniculaire : 38 arbres sur les 143 concernés. 11 présentaient une cavité, 26 au moins un sporophore de champignon lignicole et 1 seul individu présentaient à la fois l'un et l'autre.



Répartition de la mortalité (en pourcentage) de *Fagus sylvatica* par classes de diamètre dans la réserve intégrale

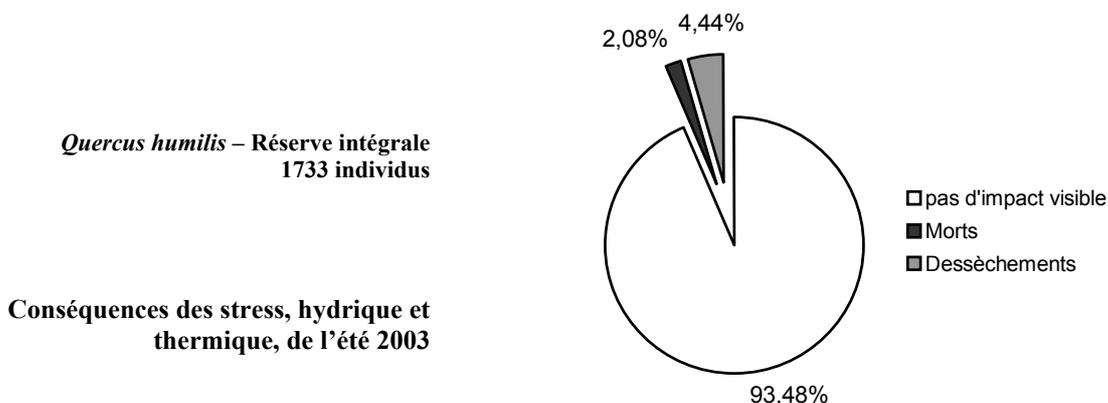


Répartition de la mortalité (en pourcentage) de *Fagus sylvatica* par classes de diamètre dans la ripisylve

Les plus gros diamètres (à partir de 70 cm) affichent une importante mortalité surtout dans la réserve intégrale. Cette classe concernent certainement des arbres s'approchant de leur longévité maximale. La mortalité est également importante pour les classes de 1 à 40 cm. L'étude de la croissance des hêtres (PARMENTIER, 1991) à partir d'une analyse dendrochronologique d'individus peuplant deux stations proches l'une de l'autre a démontré une croissance fort différente et peu de corrélations entre le diamètre et l'âge. Ces classes de diamètre accueillent des arbres relativement jeunes mais aussi des individus bien plus âgés dont la croissance est compromise par des conditions stationnelles défavorables. Les hêtres de classes intermédiaires semblent avoir mieux supporté les contraintes, hydriques et thermiques, de l'été 2003.

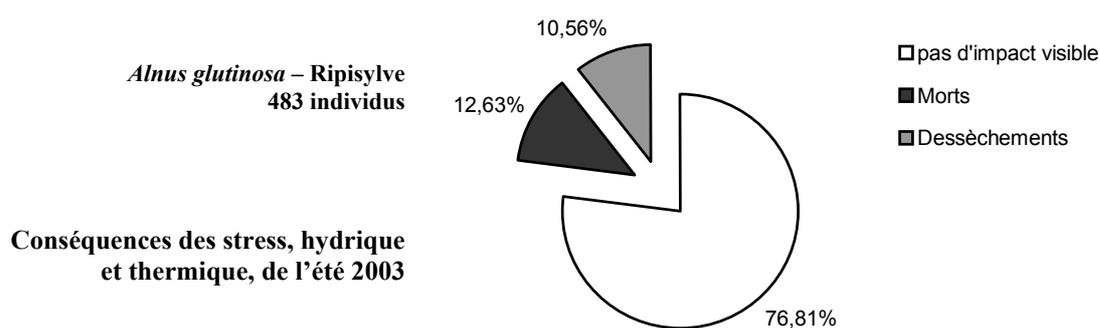
L'effet tampon de la ripisylve, garantissant certainement plus de fraîcheur et d'humidité et les disponibilités en eau peut-être plus importantes dans les sols de ces secteurs proches de la rivière expliquent probablement la mortalité plus faible enregistrée pour le hêtre.

3.4.2 - Le Chêne pubescent *Quercus humilis*



8 (22%) des 36 chênes pubescents morts après l'épisode caniculaire présentaient un signe d'affaiblissement visible : 7 présentaient une cavité et un seul présentait à la fois une cavité et un sporophore de champignons lignicoles. Pour cette espèce, l'analyse de la répartition des cas de mortalité par classes de diamètre ne fait pas ressortir de tendance aussi marquée que pour *Fagus sylvatica*. Les classes de diamètre semblent indistinctement touchées. La répartition des cas de mortalité s'expliquerait donc plutôt par les conditions stationnelles ou par la résistance individuelle.

3.4.3 - L'Aulne glutineux *Alnus glutinosa*



12,63% des aulnes glutineux ont succombé au violent épisode climatique de l'été 2003. C'est l'essence qui a été le plus sévèrement touchée.

Contrairement à la réserve intégrale, le peuplement rivulaire étudié est soumis au régime torrentiel de la rivière Massane. Les pluies diluviennes de novembre 1999 et les crues qui suivirent ont eu un impact indéniable bien que non quantifié sur la ripisylve. L'aulne très sensible aux variations du niveau d'eau compte de nombreux individus localisés dans le lit

mineur de la rivière. De ce fait, l'espèce a été la plus exposée à la violence de l'épisode hydrologique. Les cas récents de mortalité comptent en effet un pourcentage important (44%) d'arbres présentant des signes visibles d'affaiblissement antérieurs à l'été 2003. 23 individus présentaient des champignons lignicoles et 4 autres des cavités. Les contraintes hydriques et thermiques de l'été 2003 auraient donc fait basculer plus rapidement vers la mortalité des arbres déjà dépérissant.

IV – Autres perturbations pouvant avoir une influence sur l'écosystème forestier

L'ampleur des conséquences sur les peuplements forestiers (mortalité, dépérissement) d'événements climatiques comme ceux de l'été 2003 dépendent pour beaucoup des accidents antérieurs ou des contraintes à venir.

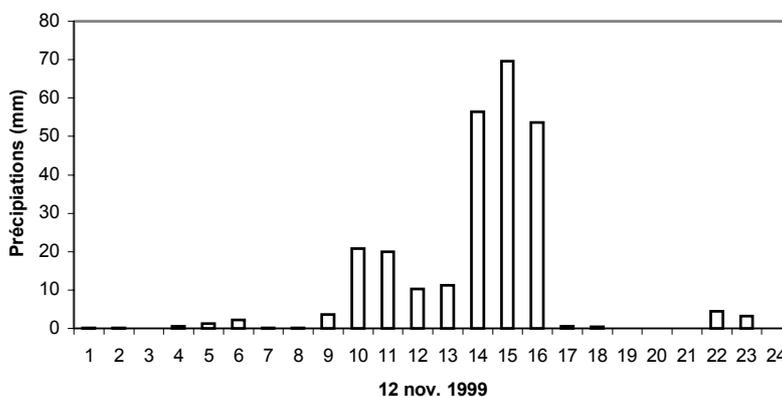
Les gels tardifs, les vents violents ou bien d'autres périodes de sécheresse ou de fortes chaleurs, s'ils surviennent dans un avenir proche viendront certainement aggraver les conséquences d'un événement climatique exceptionnel tel que celui de 2003.

En entraînant l'affaiblissement des peuplements forestiers, ces perturbations les rendent plus sensibles à d'autres perturbations, même d'intensité moindre.

Les fortes pluies de l'automne 1999 et du printemps 2004 risquent d'accentuer les effets de la sécheresse/canicule de 2003. A ce propos, sur les 28,8 ha cartographiés, 19,4 ha suivent le linéaire de la rivière Massane et sont donc, par conséquent, soumis à son régime hydrologique.

1 – Les précipitations du 12 novembre 1999

Les pluies diluviennes aux conséquences tragiques qui se sont abattues ce jour-là sur les départements de l'Aude et des Pyrénées-Orientales n'ont pas épargné la forêt de la Massane. La journée du 12 novembre a recueilli à elle-seule 258,8 mm. Les enregistrements du poste météo montrent bien la soudaineté de l'averse avec une intensité qui avoisine les 16 mm/6 min à son paroxysme provoquant une brusque montée des eaux.



Répartition par heure des précipitations (mm) recueillies le 12 novembre 1999 à la station météorologique.

Les débits n'ont pu être enregistrés, le limnigraphe ayant été emporté par les eaux. Cependant, des laissées de crue retrouvées deux mètres au dessus de la rivière attestent bien de l'importance de l'événement. Celui-ci aura certainement eu des conséquences sur l'état sanitaire de nombreux individus :

- par des collisions avec des matériaux transportés par la rivière lors de la crue (cailloux, bois mort) occasionnant des blessures ou bien par l'action mécanique du courant entraînant des déracinements.

- par les modifications brutales de la topographie de la rivière (érosion des talus, importants dépôts de sables et de cailloux, encaissement du lit, etc.) et qui ont, par conséquence, modifié les conditions stationnelles de certains individus.

Par exemple, l'abaissement de la ligne d'eau provoqué par l'incision verticale du lit sur certaines sections de la rivière risque d'être dommageable à l'aulne glutineux *Alnus glutinosa* très sensible aux variations de niveaux d'eau. De nombreux signes de dépérissement laissant présager une importante mortalité à venir avaient d'ailleurs été observés consécutivement à ce violent épisode hydrologique.

2 – Les précipitations du 16 avril et 3 mai 2004

Les journées du 16 avril et du 3 mai 2004 ont respectivement recueilli 288,8 mm et 225,8 mm d'eau. D'intensité incomparable aux pluies du 12 novembre 1999, ces précipitations et les crues consécutives (limnigraphe bloqué à 84 cm) surviennent en pleine saison de végétation et contribuent à l'affaiblissement des individus, notamment ceux touchés par les perturbations de l'été 2003.

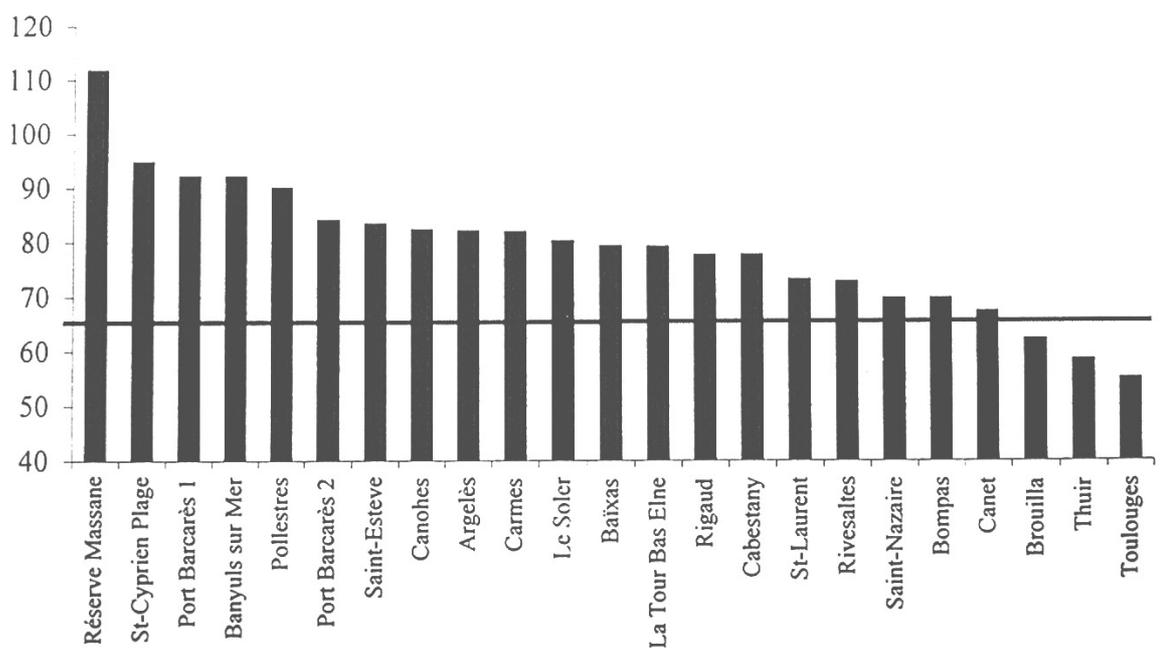
3 – L'ozone

Ce polluant secondaire est le produit de réactions chimiques complexes entre des polluants primaires issus de la circulation automobile (oxydes d'azote et composés organiques volatils) et de certaines activités industrielles ou domestiques (COV essentiellement). Ces réactions sont favorisées par un ensoleillement et une température élevés : l'ozone est un très bon traceur de la pollution photochimique. Les concentrations les plus importantes d'ozone sont mesurées de mai en octobre.

Des travaux ont montré l'impact négatif de ce polluant sur la végétation (DALSTEIN et al, 2004) notamment dans le Parc du Mercantour où l'on retrouve une situation analogue à celle du massif de l'Albera : des milieux naturels et des forêts proches des agglomérations du rivage méditerranéen, dans une région fortement ensoleillée et disposant d'une frontière montagneuse, les Pyrénées, stoppant les masses d'air chaud qui se développent sur la côte.

Une étude réalisée durant l'été 2000 sur le littoral des Pyrénées-Orientales a montré l'importance de ce polluant. « Les valeurs les plus élevées en moyenne sont mesurées sur le site rural de la réserve de la Massane, au dessus d'Argelès-sur-Mer » (FROMAGE-MARIETTE et al, 2001).

Ozone en $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Tri des sites par concentration en ozone décroissante

Objectif de qualité : $65\mu\text{g}/\text{m}^3$

Cette étude n'a malheureusement pas été reconduite, les années ultérieures et il n'y a pas de données pour l'été 2003 mais l'impact de ce polluant sur la végétation à la Massane est vraisemblablement non négligeable.

DALSTEIN et al. (2004), soulignent « l'intérêt et peut-être l'urgence pour l'impact de l'ozone de pratiquer des suivis à long terme des peuplements forestiers et de la végétation dans son ensemble. A longue échéance, l'enjeu est de taille afin de ne pas assister à la régression progressive d'une forêt naturelle à forte valeur écologique au profit de l'apparition d'autres espèces arbustives plus résistantes, agressives et hégémoniques ».

V - CONCLUSION

La conjonction prolongée de sécheresse et de fortes chaleurs de l'année 2003 marquera la climatologie de la haute-vallée de la Massane.

Les effets de la perturbation ont pu être suivis sur 29524 arbres (vivants sur pied avant l'été 2003) sur un échantillon représentatif de la forêt de la Massane (28,8 hectares soit 15,5% de l'habitat forestier).

Les conséquences d'un tel épisode climatique ne ressortiront cependant qu'au terme d'une étude beaucoup plus longue. Les travaux réalisés suite à la sécheresse de 1976 avaient établis que les effets différés de tels accidents climatiques étaient parfois détectés bien des années plus tard, parfois jusqu'à plus de 10 ans. D'autre part, ils sont modulés par les contraintes passées et à venir. A la Massane, il est toutefois possible de quantifier certains effets directs des contraintes hydriques et thermiques de l'été 2003 sur les peuplements forestiers. Les cas de mortalité directe et les cas de dépérissement sont autant de conséquences directes des stress, hydrique et thermique, auxquels ont été soumis les peuplements forestiers en 2003.

Le chêne pubescent mais surtout le hêtre et l'aulne glutineux ont été sévèrement touchés par cette exceptionnelle conjonction de sécheresse/canicule. L'impact deux fois plus important dans la réserve intégrale que dans la ripisylve démontre combien les conditions stationnelles (pente, sol, exposition) peuvent moduler les conséquences de tels événements. Si les contraintes de l'été 2003 ont été décisives pour de nombreux aulnes déjà affaiblis par l'importante crue de 1999, les hêtres les ont, en revanche, mieux supporté certainement à la faveur d'un effet « tampon » de la ripisylve garantissant plus de fraîcheur et par les plus grandes disponibilités des sols en eau dans ces secteurs proches de la rivière. C'est par contre l'espèce qui affiche dans la réserve intégrale la plus importante mortalité.

Cette perturbation climatique et ses conséquences sur les peuplements, resitués dans un contexte de forêt non exploitée, dans le cas présent à la Massane, rappellent la perturbation à dynamique douce considérée comme « moteur de la dynamique forestière » (GILG, 2004). Le dépérissement des arbres qui ont subi les stress, hydrique et thermique, engendre des modifications dans la structure du peuplement en créant de petites trouées. Dans les forêts à caractère naturel, les phases de régénération démarrent quand la chute d'arbres morts ou de branches d'arbres dépérissant permettent à la lumière de percer la canopée. Cet événement climatique pourrait donc être considéré comme une de ces perturbations qui rythment la dynamique d'une forêt à caractère naturel. Cependant, l'existence d'une influence humaine parmi les causes du changement climatique a été confirmée par de nombreux travaux (LAITAT, 2004) et les peuplements forestiers seront soumis à des perturbations de plus en plus fréquentes et intenses comme celle de 2003.

Le hêtre se trouve à la Massane en limite de son aire de répartition. Cette situation marginale si les craintes des scientifiques quant à la fréquence future d'événements climatiques comparables à ceux de l'été 2003 se vérifiaient, compromettrait certainement le maintien de la hêtraie dans cette haute-vallée du massif de l'Albera.

De par sa situation, la hêtraie de la Massane pourrait donc être considérée comme un « poste avancé du changement global » et comme un laboratoire naturel pour observer la réponse des peuplements forestiers aux perturbations diverses.

Cette hêtraie est exceptionnelle de par sa position géographique, distance à la mer, semi-altitude, la plus au sud de France continentale, association d'espèces, non-exploitation depuis 150 ans, niveau de connaissances et d'observations à long terme acquises... Aussi, pourrait-elle représenter un site atelier tout à fait pertinent pour suivre les impacts du changement global. Elle pourrait être « instrumentalisée » et diverses études dynamiques, en dehors du seul aspect observations sont envisageables pour y réaliser diverses expérimentations.

A ce titre, nous espérons que les décideurs et financeurs, conscients de ces problèmes majeurs et de l'urgence à mettre en place des outils permettant la détection des changements climatiques et de leurs conséquences, apporteront un soutien durable à cette initiative et à d'autres, et que cela ne se traduira pas seulement par des déclarations d'intentions déjà très nombreuses mais par un financement conséquent de l'activité des espaces naturels protégés.

BIBLIOGRAPHIE

- BAGNOULS, F., GAUSSEN, H., 1953 – Saison sèche et indice xéothermique, Bull. Soc. Hist. Nat., Toulouse, 88, 193-239.
- BRÉDA, N., GRANIER, A., août 2003 - Point sécheresse, UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestière, Centre INRA de Nancy
- BRÉDA, N., DREYER, E., septembre 2003 - Point sécheresse, UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestière, Centre INRA de Nancy
- COCHARD, H., 2003 - Un système conducteur vulnérable. UMR INRA-Univ. Clermont II PIAF Clermont-Ferrand – UMR INRA-UHP Ecologie et écophysiologie forestières, 54280 Champenoux.
- DALSTEIN, L. et al., 2004 – Dégradation de la forêt française en relation avec l’ozone, première approche. Environnement & Technique N°236 : 42-44
- Département de la Santé des Forêts (DSF), février 2004 – Sécheresse et canicule de l’été 2003, Quelle incidence visuelle sur les peuplements forestiers ?, Information Santé des Forêts.
- FOLCH i GUILLEM, F., 1981 – Vegetació dels Països Catalans, Institució Catalana d’Història Natural, memoria num. 10 : 1-513.
- FROMAGE-MARIETTE, et al., 2001 – Mesure de l’ozone et des BTX par échantillonnage passif sur le littoral des Pyrénées-Orientales. Été 2000. Air Languedoc-Roussillon : 1-30 et 17 annexes.
- GARRIGUE, J, MAGDALOU, J.-A., 2000 - Suivi forestier & Cartographie assistée par Système d’Information Géographique ; Réserve Naturelle de la Massane, Travaux 55 : 1-44 et carte.
- GARRIGUE, J, MAGDALOU, J.-A., 2003 - Suivi forestier & Cartographie assistée par Système d’Information Géographique ; Réserve Naturelle de la Massane, Travaux 55 Complément n°1 : 1-7 et annexes.
- GILG, O., 2004 – Forêts à caractère naturel, caractéristiques, conservation et suivi ; cahier technique n°74 ; RNF/ATEN : 1-96.
- KÖPPEN, W., 1918 – Une nouvelle classification générale des climats, Revue Générale des Sciences, 30, 550-554.
- LAITAT, E., 2004 – La science forestière en soutien des négociations internationales sur les changements climatiques et ses implications locales. Biotechnol. Agron. Soc. Environn. (2) : 125-132.
- MAGDALOU, J.-A., HURSON, Ch., GARRIGUE, J., 2002 - Suivi ripisylve & Cartographie assistée par Système d’Information Géographique ; Réserve Naturelle de la Massane, Travaux 62 : 1-28 et annexes.
- PAULY, H., BELROSE, V., 2005 - Sécheresse et canicule de l’été 2003 : observation en 2004 des conséquences sur les peuplements forestiers adultes. Résultats détaillés pour les essences. Département de la santé des forêts.

- PARMENTIER, S., 1991 - Etude de la croissance de hêtres dans la réserve naturelle de la Massane. Réserve Naturelle de la Massane, Travaux 30 : 1-32
- QUÉZEL, P., MEDAIL, F., 2003 - Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen; Ed. Elsevier : 572
- RAMBAL, S. et RATTE, J.-P., 2005 – Forêts méditerranéennes, sécheresses et changements climatiques. CEFE, CNRS. SIEF, Site d'information sur les écosystèmes forestiers.
- RICHARD, F., MILLOT, S., GARDES, M., SELOSSE, M.-A., 2005 - Diversity and specificity of ectomycorrhizal fungi retrieved from an old-growth Mediterranean forest dominated by *Quercus ilex*. *New Phytologist* 166 : 1011-1023
- RNF – 2003 – Mini-questionnaire Feux et Canicule 2003. Etat de la synthèse au 29/08/03.
- TRAVÉ, J., DURAN, F., 1984 - Contribution à la connaissance du mésoclimat de la Réserve Naturelle de la Massane. Réserve Naturelle de la Massane, Travaux 14 : 1-23
- TRAVÉ, J., GARRIGUE, J., DURAN, F., 1996 – Le mésoclimat de la réserve naturelle de la Massane. Réserve Naturelle de la Massane, Travaux 45 : 1-28
- ZERAIA, L., 1981 – Essai d'interprétation comparative des données écologiques, phénologiques et de production subéro-ligneuse dans les forêts de chêne-liège de Provence cristalline (France méridionale) et d'Algérie. Thèse, Faculté des sciences et techniques St Jérôme, Université d'Aix-Marseille.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les membres du Conseil d'Administration de l'Association des Amis de la Massane, gestionnaires de la Réserve Naturelle, qui apportent leur aide et leur soutien permanents aux études menées sur le site. Nous remercions plus particulièrement Gilles Boeuf et Joseph Travé pour la relecture et les nombreuses pistes de réflexion apportées à ce document.

Joseph Travé a été à l'initiative de ces travaux de cartographie qu'il a défendu à tous les niveaux, dans un contexte budgétaire extrêmement difficile. Pour cet investissement bénévole, parfois très ingrat dans les tâches à accomplir, nous lui sommes très reconnaissants.

C'est en tout cas, avec une passion communicative qu'il a toujours défendu les intérêts de ce site extraordinaire.