

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/308120751>

Impact des incendies sur la tortue d'Hermann. Résultats des études menées dans le Var

Technical Report · January 2008

DOI: 10.13140/RG.2.2.27699.63527

CITATION

1

READS

314

3 authors:



Marc Cheylan

Ecole Pratique des Hautes Etudes

264 PUBLICATIONS 2,297 CITATIONS

SEE PROFILE



Thibaut Couturier

15 PUBLICATIONS 143 CITATIONS

SEE PROFILE



Guillaume Astruc

Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive

27 PUBLICATIONS 152 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

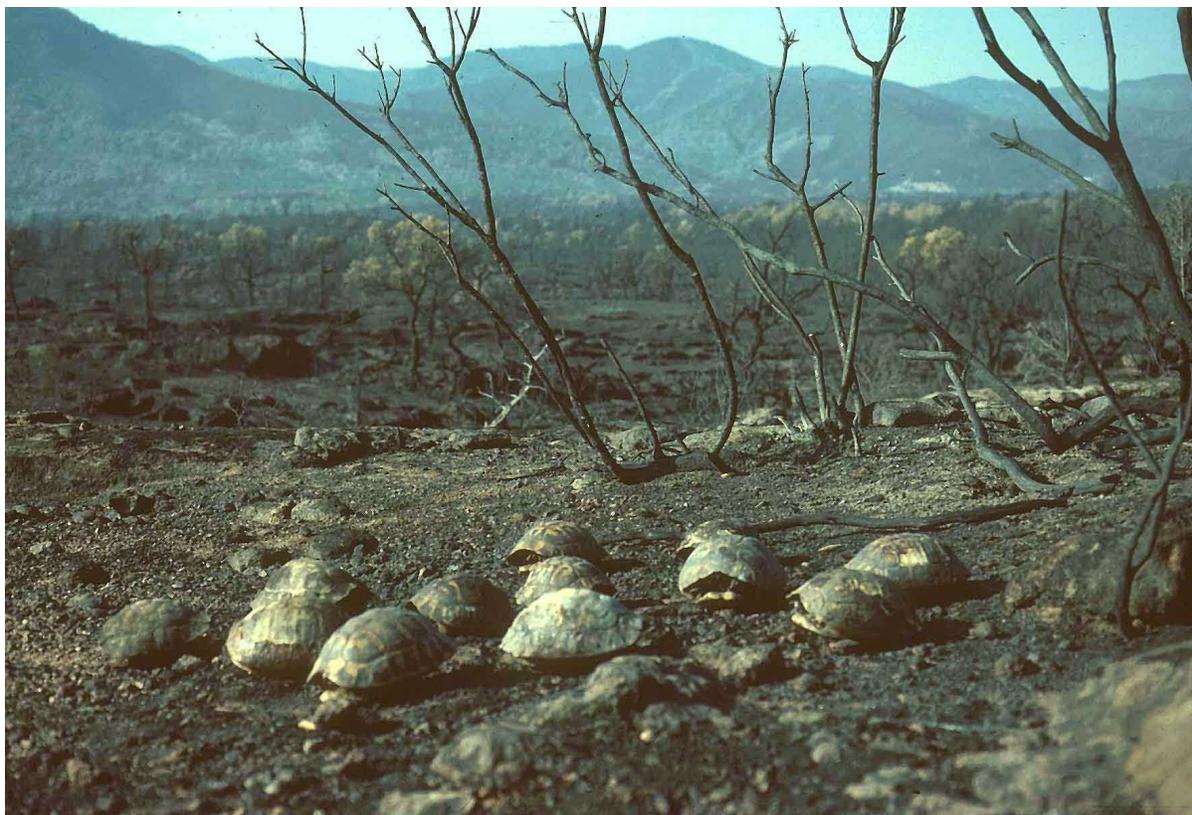


Global Reptile Assessment by Species Specialist Group (International) [View project](#)



personnal [View project](#)

Impact des incendies sur la tortue d'Hermann Résultats des études menées dans le Var.



Marc Cheylan, Thibaut Couturier, Guillelme Astruc

Rapport final, décembre 2008

Ce document rend compte des travaux réalisés dans le cadre du contrat d'étude porté par le Conservatoire-Etude des Ecosystèmes de Provence (CEEP) intitulé « *Etudes et opérations pilotes de restaurations écologiques suite aux incendies de 2003 et 2005* ».

Il correspond au volet 2 de la convention, à savoir l'étude de l'impact des feux sur les populations de tortues d'Hermann.

Introduction

L'étude a été menée à deux échelles. La première - ensemble du Var - a pour but de faire une analyse descriptive des incendies dans le département et de mettre en lien les foyers de population de tortues d'Hermann avec les différents régimes d'incendies. La seconde, menée à l'échelle de la plaine des Maures. Il vise à mettre en évidence l'impact du feu sur la mortalité des tortues, sur les densités et sur les structures démographiques.

I. Var

1.1 Analyse du régime d'incendies à l'échelle du département

Méthode

Nous nous appuyons pour cette étude sur la carte des incendies répertoriés à l'échelle du Var de 1958 à 2006 par l'Office National des Forêts ONF (Figure 1). Ces données ont été fournies sous forme de cartographies SIG. Lors de cette analyse, seuls les incendies d'une surface supérieure à 4 hectares ont été utilisés. Les petits incendies peuvent en effet être dus à des artefacts cartographiques.

Pour calculer la fréquence de retour des incendies, nous avons positionné 12 343 points espacés de 700 mètres sur l'ensemble du Var. Par traitement SIG, nous avons pu attribuer à chacun de ces points le nombre de feux et leur identité (date). Cette méthode a tendance à sous-estimer les surfaces incendiées à l'inverse de l'utilisation d'une grille, qui aurait eu pour effet de surestimer ces mêmes surfaces. Pour estimer cette erreur, nous avons dans un second temps comparé les surfaces réelles à celles obtenues par un maillage de points.

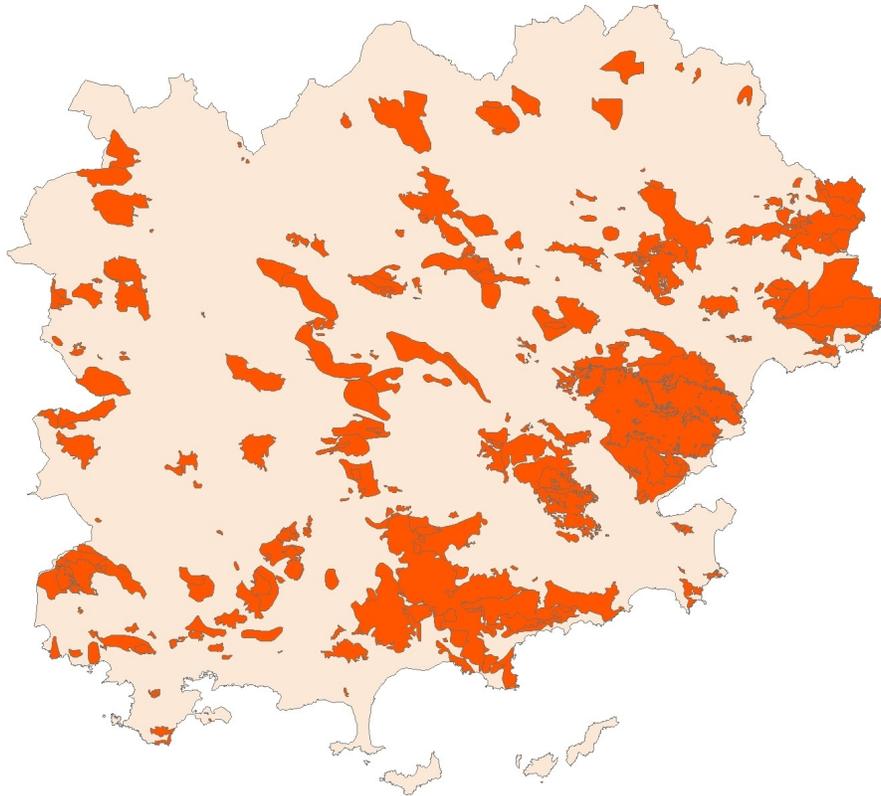


Figure 1 : Incendies (rouge) recensés par l'ONF de 1958 à 2006 dans le département du Var.

Résultats

Sur le département du Var, 310 incendies de plus de 4 hectares ont été cartographiés par l'ONF entre 1958 et 2006 (48 ans). Au total, 140 263 hectares ont brûlé au moins une fois entre 1958 et 2006 soit 23.18% de la surface du département. La carte montre que ces incendies sont plus fréquents dans la partie littorale du département, en particulier dans les massifs des Maures et de l'Estérel.

Superficies incendiées selon les années

Elles sont très variables selon les années (figure 2). Huit années sont concernées par des superficies incendiées supérieures à 10 000 hectares au cours de la période considérée. Les derniers grands incendies datent de 1990 et 2003. La période 1991-2007 se caractérise par une faible fréquence de feux, à l'exception de l'année 2003.

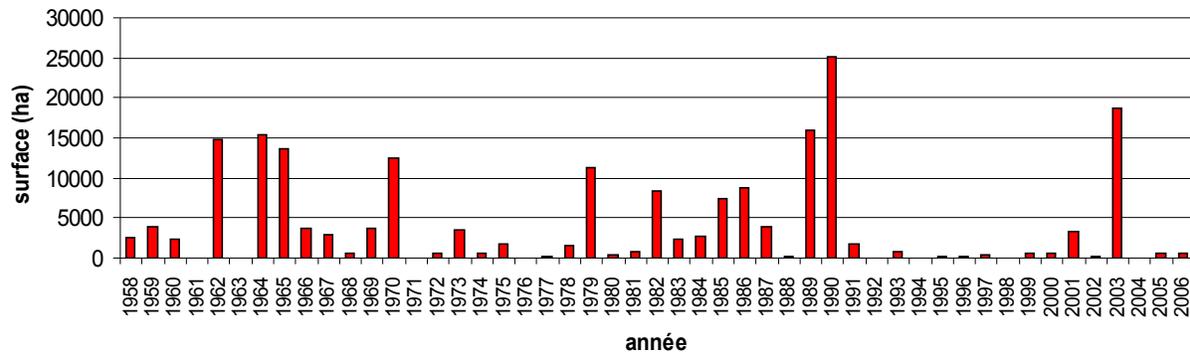


Figure 2 : Surfaces incendiées annuellement dans le département du Var.

Fréquences d'incendies

Les proportions de surfaces incendiées mesurées à partir de points sont identiques à celles obtenues avec les polygones surfaciques.

16.4% du territoire a brûlé une fois et 6.8% du territoire a brûlé de 2 à 5 fois au cours de la période étudiée (tableau 1). Les fréquences d'incendies ont également été transcrites en temps de retour moyen du feu.

Tableau 1 : Surfaces incendiées (1958-2006) selon la fréquence du passage du feu.

nombre d'incendies : n	Temps de retour moyen : 48/n (années)	Surface du Var considérée (%)
0	>48	76.82
1	48	16.41
2	24	5.22
3	16	1.32
4	12	0.19
5	9.6	0.03

Surfaces rebrûlées

Le tableau 2 nous indique que 29.18% des zones incendiées au moins une fois ont à nouveau brûlé. Parmi ces zones brûlées au moins deux fois, 22.78% ont brûlé au moins une fois supplémentaire. 14.29% des zones incendiées à 3 reprises ont à nouveau brûlé et 13.64% ont connu un dernier passage du feu. Ceci indique que les incendies ne se

distribuent pas de façon aléatoire sur le territoire, mais repassent préférentiellement sur les mêmes secteurs. Cette constatation, qui a été faite de longue date dans la région considérée, est toutefois importante à souligner car a des implications importantes sur les populations de tortues d'Hermann (cf. partie 2.4).

Tableau 2 : Surfaces rebrûlées

Passages du feu	% de la superficie du Var	% rebrûlé
au moins 1 fois	23.17	-
au moins 2 fois	6.76	29.18
au moins 3 fois	1.54	22.78
au moins 4 fois	0.22	14.29
5 fois	0.03	13.64

1.2 Analyse du régime d'incendies au sein de l'aire historique de l'espèce

L'échelle varoise est trop générale pour nous renseigner finement sur la rythmicité des incendies dans l'aire occupée par la tortue d'Hermann. Nous proposons donc dans ce chapitre une analyse plus resserrée du phénomène, circonscrite à l'aire potentielle d'extension de l'espèce.

Matériel et méthode

- Zone prise en considération :

Deux zones ont été prises en considération : l'ensemble de l'aire historique de l'espèce (en rouge) et le Massif et la plaine des Maures (en vert).

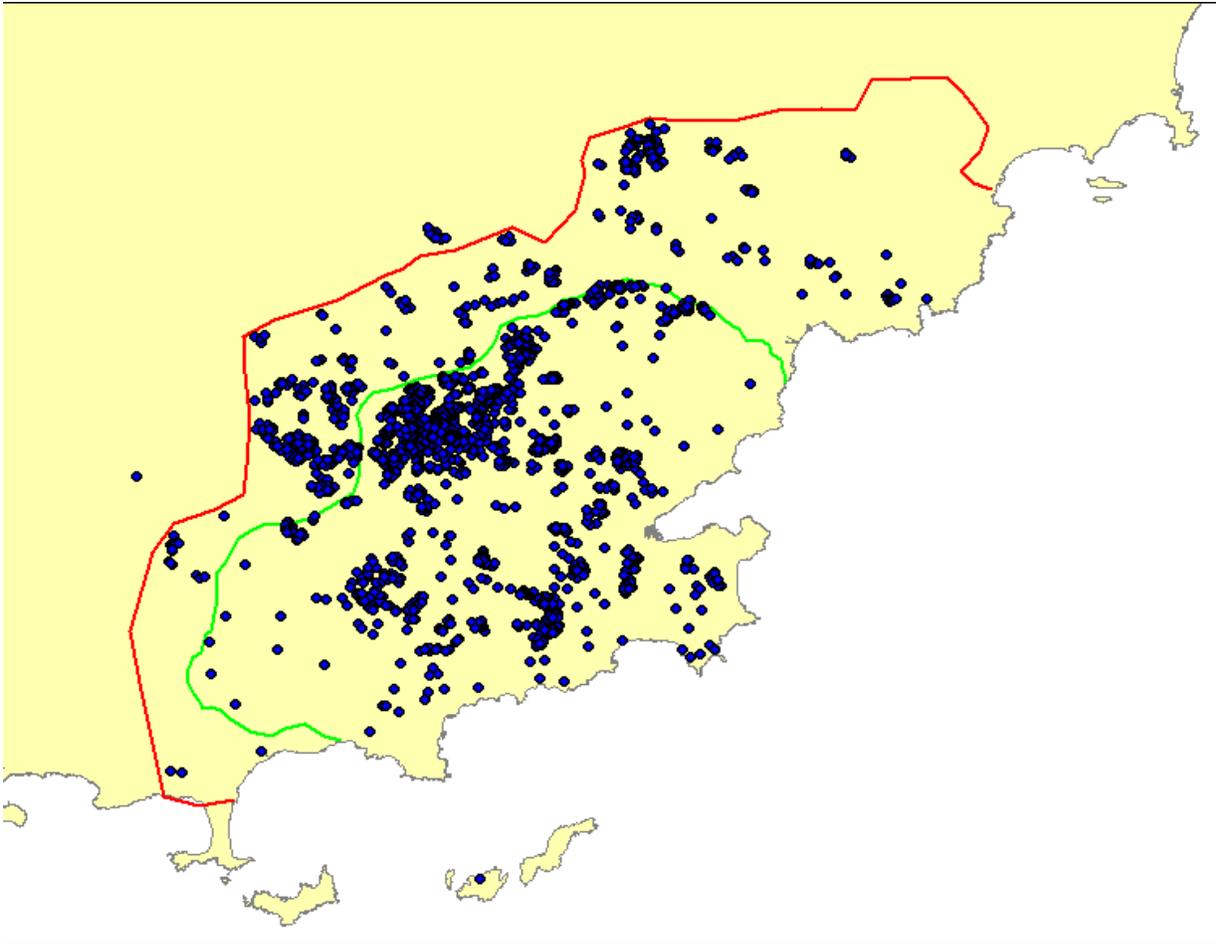


Figure 3 : périmètres retenus pour l'étude à l'échelle locale : en rouge, aire potentielle historique de distribution de l'espèce, en vert, limite adoptée pour le massif et la plaine des Maures. Points bleus : observations de tortues d'Hermann

- Cartographie des incendies :

Pour la définition des espaces incendiés, nous avons exclues de l'analyse les zones non incendiables : vignes, zones urbanisées, lacs etc.... Cette exclusion a été réalisée à partir de la cartographie Corine Land Cover (1999). Sur les zones restantes, une grille de 500 mètres de côté a été superposée à la carte des incendies. Une requête a permis de calculer le nombre d'années entre chaque feu et d'en déduire un temps moyen d'occurrence des incendies sur chacune des mailles de la grille.

- Cartographie des populations de tortues :

La cartographie des tortues repose sur l'ensemble des données récoltées depuis 1975 dans le Var. Il s'agit de données collectées de façon non standardisée émanant de diverses sources : données personnelles, données issues de diverses études et de divers observateurs. Compte tenu de leur étendue à la fois temporelle et spatiale, on peut estimer qu'elles illustrent assez bien la distribution de l'espèce dans le Var. En revanche, leur grande dispersion temporelle ne permet pas de les « caler » dans une tranche de temps très resserrée, ce qui rend délicat la mise en parallèle de l'effet feu sur la distribution de l'espèce. Dans l'avenir, il conviendra de disposer d'un « instantané » de la distribution de l'espèce permettant de croiser efficacement les deux distributions : feu et tortues.

Résultats

I. Importance des incendies.

a) A l'échelle de l'aire potentielle de l'espèce :

Durant la période 1958-2006, 54% de l'aire potentielle de l'espèce (soit 203 600 ha) a été parcourue au moins une fois par l'incendie (soit 110 000 ha), 27% au moins deux fois, et 9% trois fois et plus (tableau 3 ci-dessous).

Tableau 3 : importance des incendies sur l'aire potentielle de l'espèce. Les superficies ont été calculées à partir du nombre de carreaux.

Nombre de feux	Superficie (ha)	%
0	93600	45,97
1	55800	27,41
2	35650	17,51
3	15050	7,39
4	2425	1,19
5	1050	0,52
6	25	0,01
	203 600	100,00

La carte (figure 4) montre la localisation des incendies durant la période prise en considération. On voit que les feux ont surtout touché les massifs de l'Estérel, du Tanneron et de la Colle du Rouet à l'est, la partie est du massif des Maures, la partie centrale et l'ouest du massif. La ceinture permienne a été moins touchée, essentiellement sans doute du fait de sa forte dominante agricole. Dans le massif des Maures, les zones relativement épargnées sont la forêt domaniale des Maures et la presqu'île de St-Tropez. Il s'agit toutefois de zones très boisées, donc peu favorables à la tortue d'Hermann.

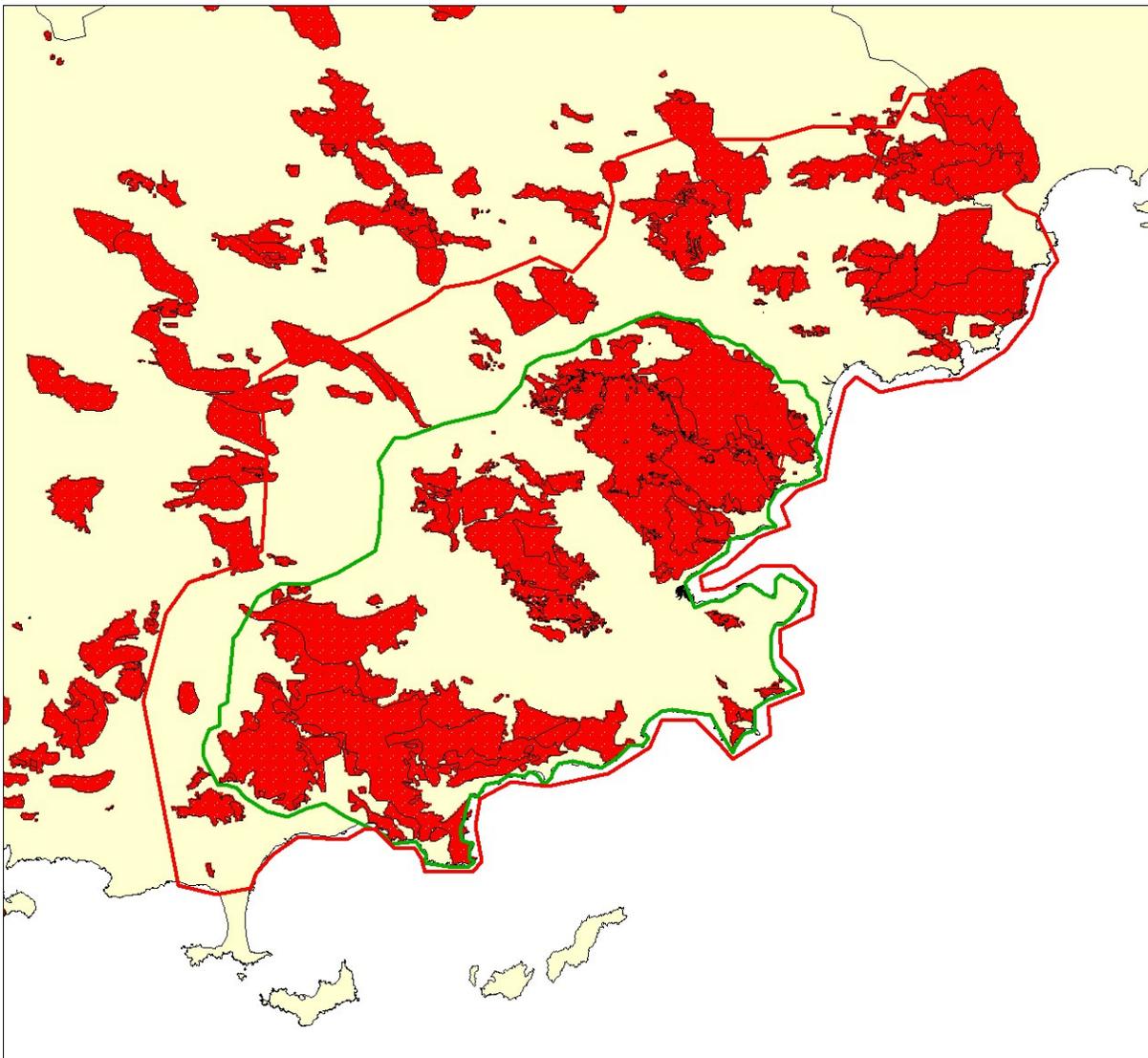


Figure 4 : extension des incendies (1958-2006) dans la zone historiquement occupée par la tortue d'Hermann (ligne rouge).

b) A l'échelle du Massif des Maures :

Dans le massif des Maures, les incendies ont parcouru environ 69 700 ha, soit 62,5% de l'aire disponible pour la tortue (111 575 ha) (tableau 4).

Tableau 4 : importance des incendies de forêts dans le massif des Maures

Nombre de feux	Superficie (ha)	Pourcentage
0	41875	37,53
1	29825	26,73
2	24775	22,20
3	12100	10,84
4	1925	1,73
5	1050	0,94
6	25	0,02
	111 575	100,00

Discussion

A l'échelle de l'aire historique de l'espèce, les incendies de forêts ont couvert au moins 54% du territoire depuis 1958, soit en moyenne une superficie de 1,1% par an (sans compter les répétitions d'incendie sur une même zone). A l'échelle du massif des Maures, la fréquence s'élève à 62,5%, soit une fréquence annuelle de 1,3%. Si ce rythme se maintient, la totalité du massif des Maures aura brûlé au moins une fois d'ici 31 ans ce qui constitue un rythme de feu assurément excessif pour le maintien de l'espèce sur ce territoire. Une partie importante du massif a en effet brûlé 3 fois et plus ces 50 dernières années (13,5%), soit un temps de passage du feu compris entre 12 et 16 ans seulement. Dans ces zones, les possibilités de survie d'une population viable sont nulles à quasi nulles.

II. Mise en coïncidence de la distribution de l'espèce avec les incendies

La carte ci-dessous met en coïncidence la fréquence des incendies avec la distribution de l'espèce. Comme on peut le constater, la grande majorité des points de

présence de l'espèce se placent dans les zones peu ou pas incendiées. Les données de présence de la tortue sont particulièrement peu nombreuses dans les zones incendiées deux fois et plus : massif de l'Estérel, est et ouest du massif des Maures. Les concentrations de points se situent dans les zones peu ou non incendiées durant cette période : plateau de Flassans-Gonfaron, plaine des Maures, partie centrale des Maures, presqu'île de St-Tropez.

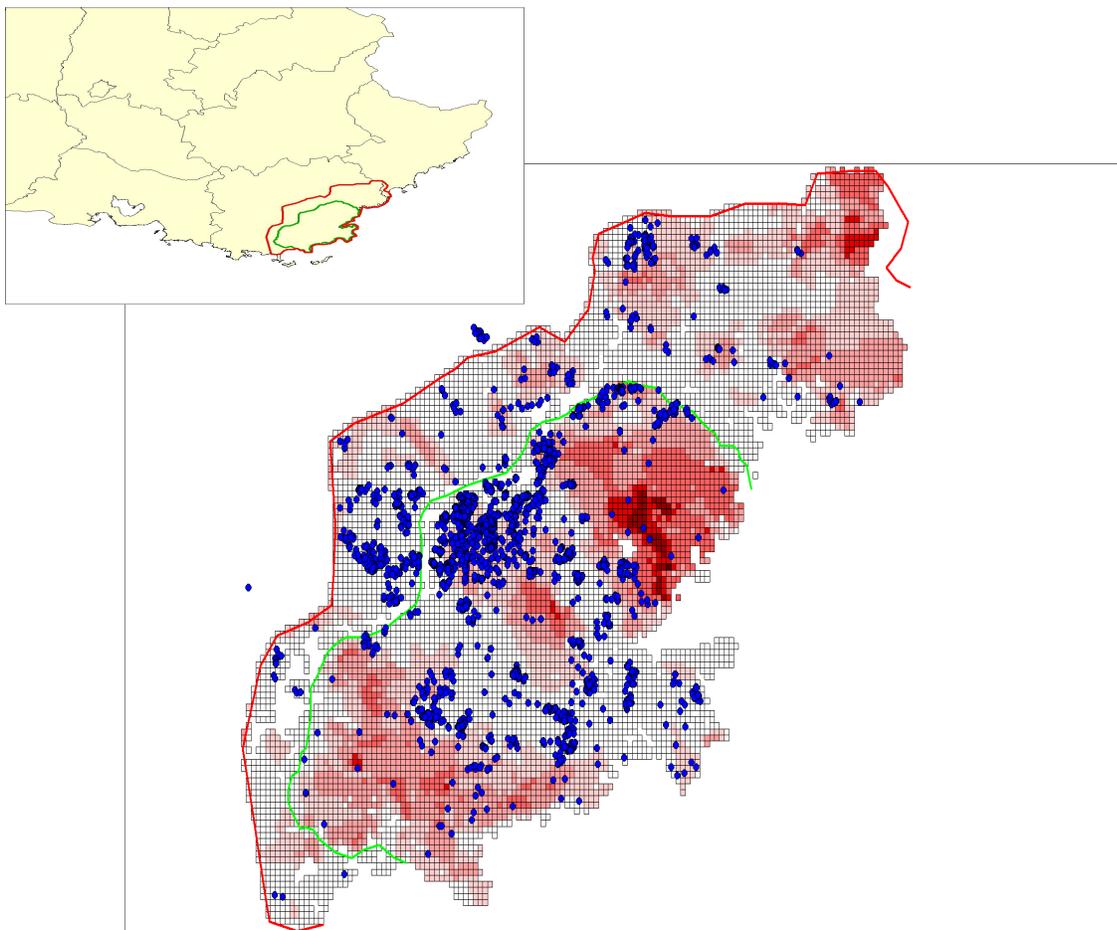


Figure 5 : fréquence des feux dans l'aire occupée par la tortue d'Hermann (période 1958-2005) et distribution de l'espèce (points bleus).

Tableau 5 : nombre de carreaux où des tortues ont été contactées ou non en fonction du nombre de feux.

Nombre d'incendies	Tortue présente (nb carreaux)	Tortue absente (nb carreaux)
0	459	3285
1	289	1943
2	84	1342
3	19	583
4	4	93
5	2	40
6	0	1

Comme le montrent le tableau 5 et la figure 6, la fréquence de l'espèce (exprimée par le nombre de cellules occupées par l'espèce) croît significativement dans les zones non incendiées ou peu incendiées (1 seul feu), et décroît fortement à partir de deux incendies. Ceci tendrait à indiquer qu'au-delà de 2 incendies, les effectifs sont réduits à des valeurs excessivement basses, sans doute incompatibles au maintien de populations viables.

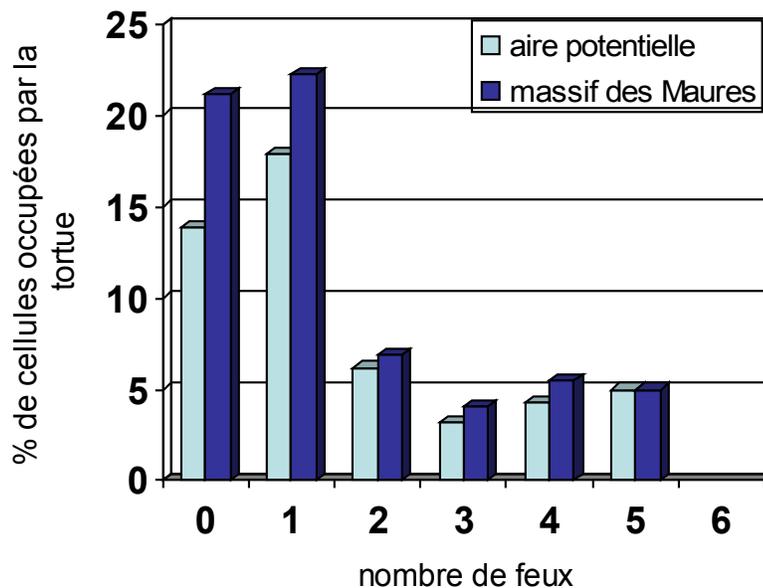


Figure 6: nombre de mailles occupées par la tortue d'Hermann en relation avec la fréquence des feux sur la maille.

Discussion :

Ces premiers résultats indiquent qu'il existe une corrélation spatiale forte entre la distribution de l'espèce et la fréquence des incendies, que ce soit à l'échelle de l'aire historique de l'espèce comme à l'échelle du massif des Maures. Les zones incendiées 2 fois et plus ne possèdent plus de populations viables, tout au plus quelques individus d'origine parfois incertaine (lâchers par la SOPTOM ou tortues échappées de captivité ?). Les zones incendiées une seule fois semblent posséder des densités de tortues encore satisfaisantes ce qui plaide en faveur de l'idée qu'un rythme de feu de l'ordre de 50 ans est acceptable par l'espèce. En revanche, un rythme de feu inférieur à 25 ans semble très préjudiciable à l'espèce. Les résultats obtenus dans la plaine des Maures montrent que les effets de l'incendie se font sentir près de 27 ans après le feu sur les densités et les structures démographiques ce qui confirme les indications fournies à plus large échelle.

II. Plaine des Maures

La plaine des Maures accueille aujourd'hui la plus importante population de tortues d'Hermann de France continentale. Elle est par ailleurs fréquemment soumise aux incendies ce qui rend cette zone intéressante pour mesurer l'impact des incendies sur les populations de tortues. Plusieurs questions ont pu être abordées sur ce territoire :

- Est-ce que la fragmentation des habitats naturels agit sur la dynamique du feu ?
- Quelle est la mortalité des tortues immédiatement après le feu ?
- Quels sont les impacts à long terme sur les populations ?
- Quels sont les impacts du feu sur les structures démographiques ?

2.1 Présentation de la zone d'étude

La plaine des Maures se situe au nord est de Toulon dans le département du Var (43°18'-43°25'N, 6°17'-6°29'E) (figure 6). Il s'agit d'une plaine alluviale, irriguée par le bassin versant de la rivière Aille qui s'écoule sur des substrats constitués pour l'essentiel de grès et d'argiles d'âge permien. Ce substrat est le support d'une végétation

méditerranéenne diversifiée, dominée par des formations de type maquis, des forêts claires de chênes-lièges et des pinèdes de pins parasols et maritimes. Le reste du territoire est principalement occupé par des constructions et des vignes.

L'étude a porté sur un territoire de 12 000 hectares (Figure 7).

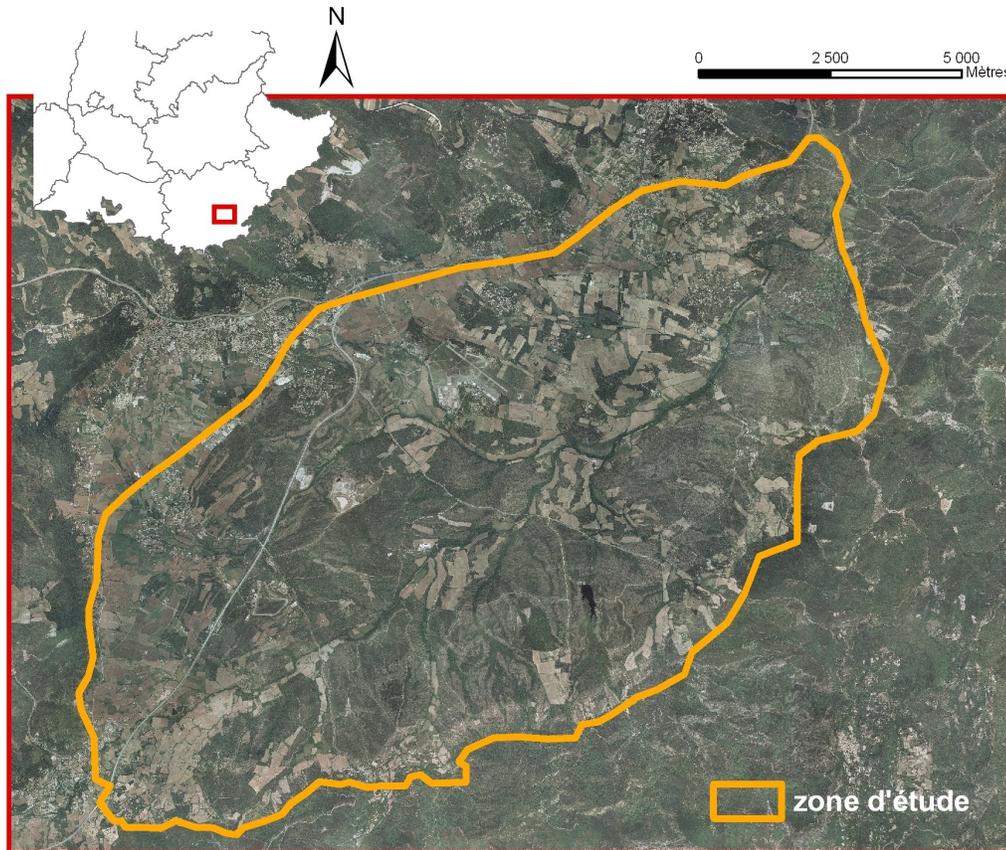


Figure 7 : Localisation et délimitation de la zone d'étude

Huit incendies ont été recensés sur la plaine des Maures au cours des 50 dernières années (figure 8). Au total, environ 28,7% de la surface de la plaine a brûlé au moins une fois. Certains incendies ont eu des étendues très faibles (quelques hectares), alors que d'autres se sont propagés sur une grande partie du territoire, par exemple en 1979 où 23% de la plaine a été livré aux flammes.

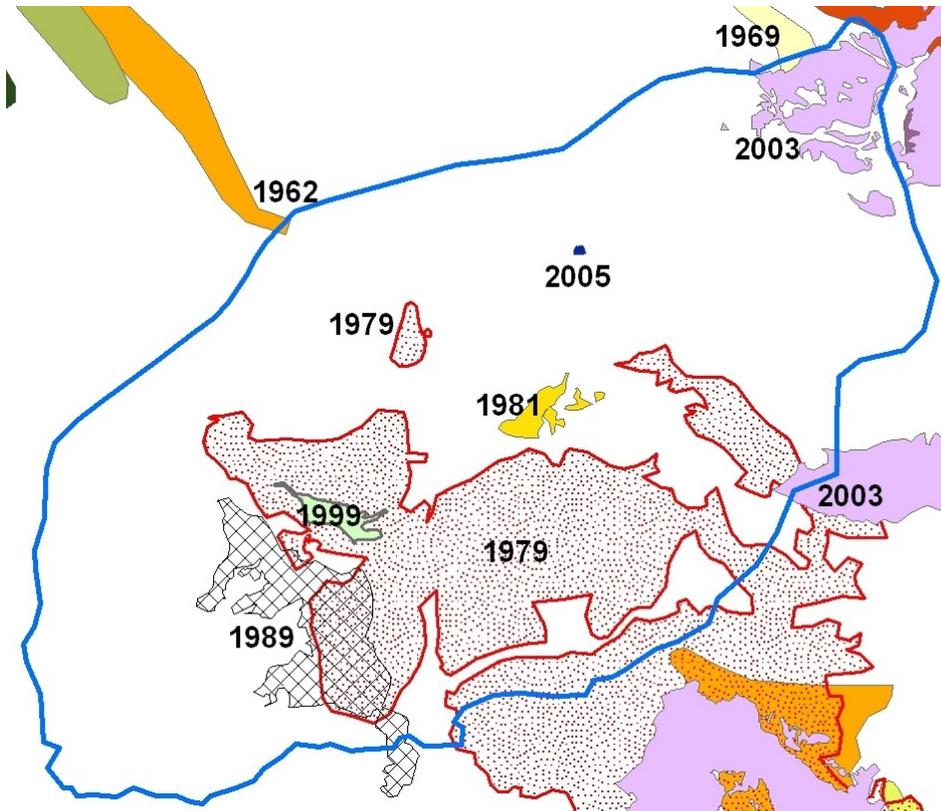


Figure 8 : Localisation et date des incendies sur la zone d'étude

2.2 Effet de la fragmentation des habitats naturels sur l'occurrence des incendies

L'implantation des vignes et des habitations constitue une barrière à la propagation du feu. Nous avons donc cherché à savoir dans quelle mesure la fragmentation des habitats naturels agit sur l'occurrence des incendies.

Méthodologie

Définition et délimitation des habitats favorables :

Par habitats favorables, nous avons considéré tous les habitats naturels potentiellement favorables aux tortues, en opposition aux milieux défavorables que sont les zones urbanisées (routes, urbanisations diverses), les vignobles, les golfs et un centre d'enfouissement. Les zones potentiellement favorables regroupent donc à la fois les

habitats naturels, mais aussi les habitats agricoles abandonnés (friches, vignes abandonnées etc.) utilisables par les tortues.

La reconnaissance des habitats a été effectuée sur un Système d'Information Géographique (SIG ; logiciel Arcgis 9.2) à partir de l'examen des photos aériennes de 2003 et de notre connaissance du site.

Il est à noter qu'il s'agit bien d'habitats potentiellement favorables, car la qualification d'habitat effectivement favorable nécessiterait une vérification de terrain sur tout le territoire, ce qui n'a pas été possible dans le temps imparti. Pour simplifier, nous parlerons par la suite d'habitats favorables.

Nous avons tout d'abord tracé les fragments défavorables (figure 9a) à échelle constante de 1:4000. Une fois la matrice d'habitat défavorable établie, les espaces restants constituaient les fragments d'habitats favorables pour la tortue d'Hermann (figure 9b).

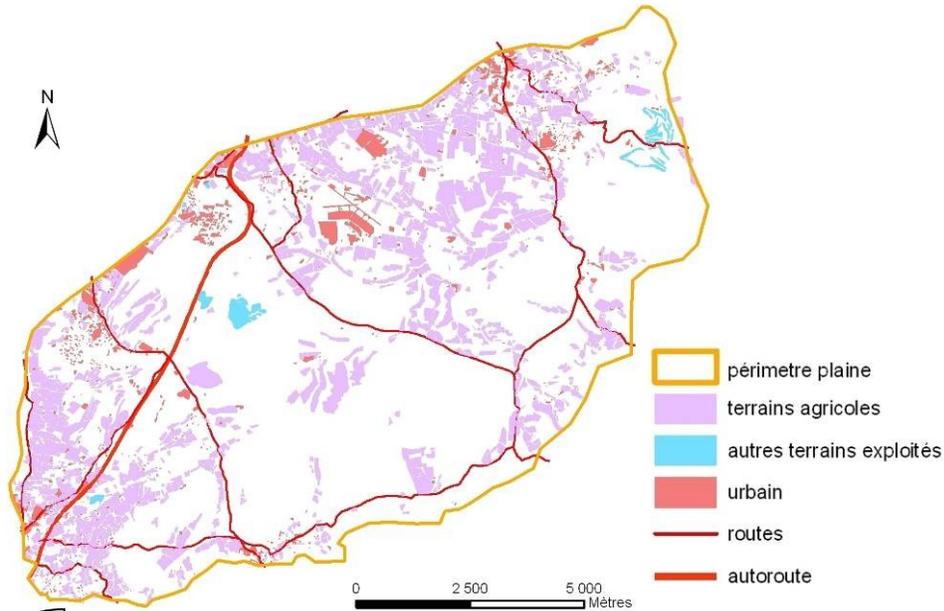


Figure 9a : Habitats défavorables à la tortue d'Hermann

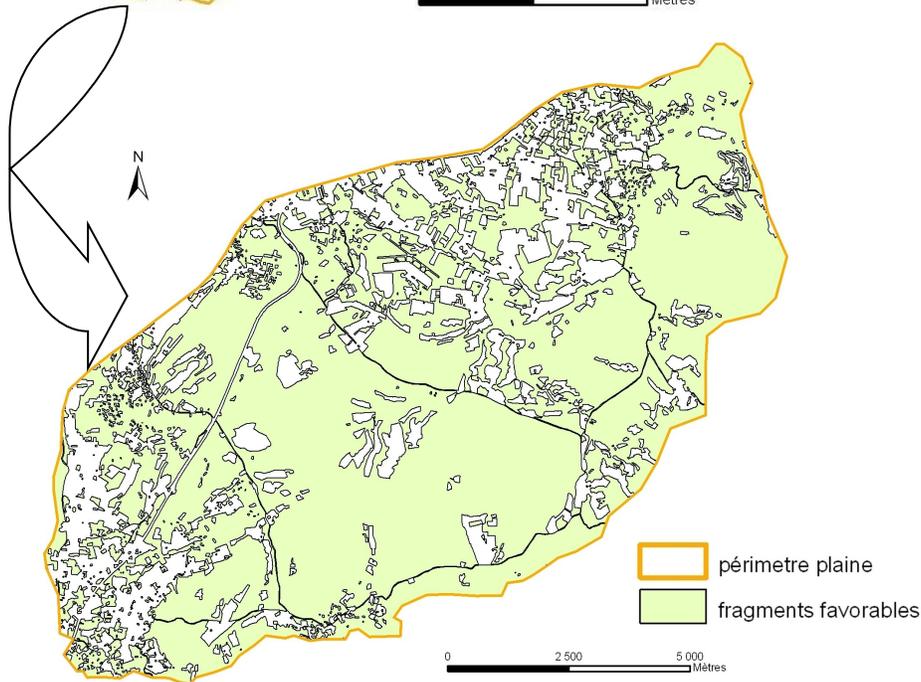


Figure 9b : Habitats potentiellement favorables à la tortue d'Hermann

Effet de la taille des fragments sur le passage du feu

Pour tester si la taille des fragments avait une influence sur la probabilité d'occurrence des incendies, 150 points ont été positionnés aléatoirement sur l'ensemble des zones brûlées et 150 points dans les zones non brûlées. A chacun de ces points a été attribuée la surface du fragment auquel il appartient. Les données de

tailles de fragments n'étant pas distribuées selon une loi normale, un test de Mann Whitney a permis de tester l'influence de la taille des fragments sur l'occurrence ou non d'incendies. Cette analyse a été réalisée à l'aide du logiciel R 2.5.1. (Ikaha & Gentleman, 1996).

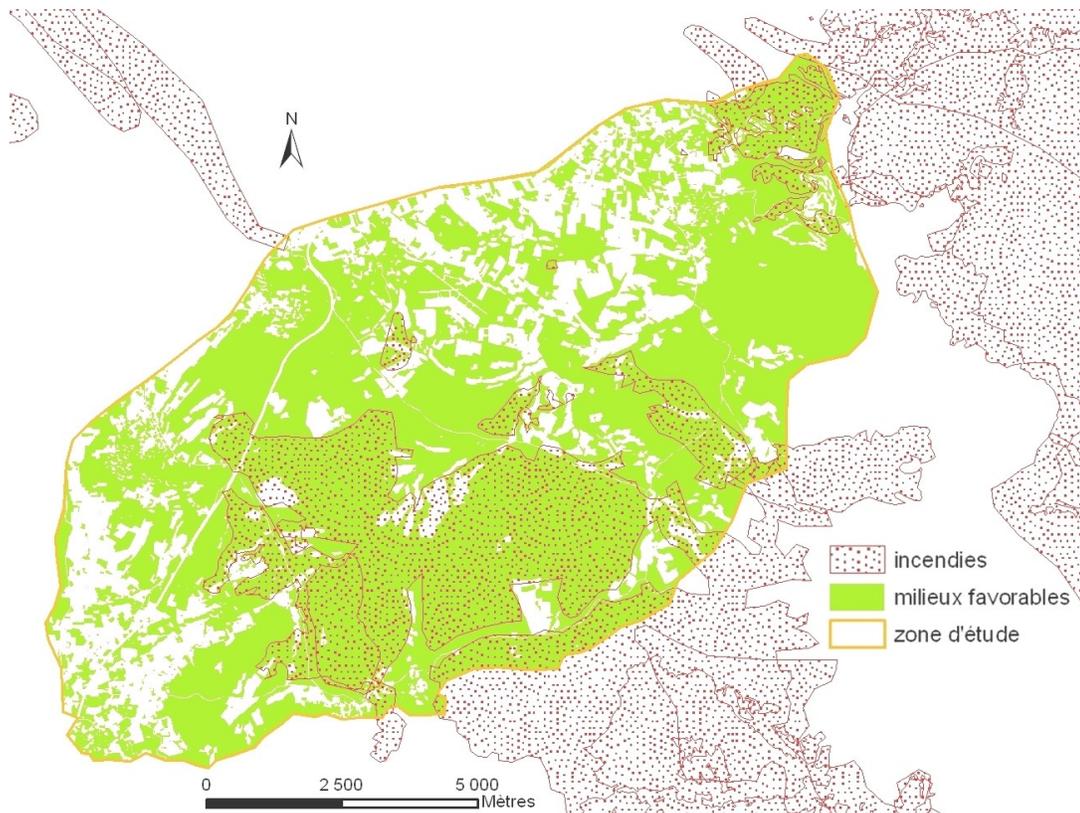


Figure 10 : Milieux favorables aux tortues et zones incendiées au cours des 50 dernières années.

Résultats

La taille du fragment agit significativement sur l'occurrence des feux (test de Mann-Whitney hautement significatif $W= 17521.5$, valeur de $p < 2.2 \times 10^{-16}$). La fragmentation du paysage a donc une influence forte sur la probabilité de passage des incendies.

2.3 Mortalité des tortues immédiatement après feu.

Elle a été évaluée à partir de prospections menées après feu. Ces prospections ont permis d'estimer, à partir du nombre de cadavres et du nombre d'individus vivants observés après feu, l'incidence de celui-ci sur les populations. Cette méthodologie comporte des biais dans la mesure où l'on fait l'hypothèse d'une détectabilité similaire entre individus morts et individus vivants. Par ailleurs, certains cadavres peuvent être emportés par des prédateurs dans les jours qui suivent le feu et conduire à sous-estimer la mortalité. Ces biais sont difficiles à évaluer mais, lorsque les prospections sont faites assez rapidement, au milieu d'une vaste zone brûlée, en explorant très méticuleusement une parcelle échantillon, on peut penser qu'ils sont réduits.

Méthode

6 sites ont faits l'objet de prospections : la plaine des Maures après le feu de 1979, le vallon du Pey (Plan-de-la-Tour) après les feux de 1990 et 2003, San Luen (Le Muy) après le feu de 2006 (Catard, 2006), Mouresse (Vidauban, plaine des Maures) après le feu de 2005 (Gauthier, 2005), la forêt domaniale des Terres Gastes (Puget-sur-Argens) après le feu de 2005 (Gauthier, 2005) et les Rochers de Roquebrune (Le Muy et Roquebrune) (Gauthier, 2005). Les deux premiers sites ont été prospectés par Marc Cheylan et collaborateurs, les 4 suivants par Le CEEP (Antoine Catard) et par Reptil' Var (Joël Gauthier).

- plaine des Maures : le site retenu se situe le long du Mourrefrey sur une superficie de 8,58 ha. Il a été entièrement incendié les 9 et 10 août 1979. Les prospections post-incendie ont été faites 22 jours après le sinistre, sur une durée de 2 jours. La zone retenue a été choisie au centre de l'incendie de façon à limiter les effets de marges (fuite ou apport d'individus à partir de la périphérie du feu), mais aussi les effets possibles des prédateurs (prélèvement de cadavres).

Toute la zone a été minutieusement prospectée à la recherche de cadavres et de survivants. La configuration de la zone (terrain relativement plat, sans chaos rocheux) laisse à penser que peu de cadavres ou individus vivants ont pu échapper à l'observation. La rapidité du feu a, dans la plupart des cas, permis de conserver l'écaillage intacte des tortues. Aucun individu, même très jeune ne semble avoir subi

une crémation complète. La découverte des animaux vivants a grandement été facilitée par l'observation des traces laissées dans la cendre qui révèlent facilement la présence d'une tortue. Résultats : les prospections ont permis d'identifier 20 tortues mortes et 6 tortues vivantes, ce qui correspondrait, dans le cas présent, à un taux de survie de 26%. La densité sur le site était donc dans ce secteur d'environ 3 ind/ha avant sinistre et 0,7 ind/ha après feu.

Ces résultats sont à prendre avec précaution. Toutefois, la configuration du site (peu de caches, absence totale de végétation arborescente après feu) laisse à penser que les probabilités de découverte des individus vivants n'était pas très différente de la probabilité de découverte des cadavres, ce qui donne une certaine fiabilité à ces chiffres.

- Vallon du Pey : les prospections ont été menées le 3 et le 17 août 2003, soit 5 et 21 jours après le sinistre. Elles se sont concentrées en fond de vallon, le long du ruisseau, qui concentrait, en cette période de fortes chaleurs, toute la population de tortues. Comme précédemment, la zone a été minutieusement fouillée. Tous les cadavres étaient en place et ne présentait pas de traces de prédation. Les survivants se situaient tous dans le lit du cours d'eau. Leur présence se révélait à des traînées de terre fraîche menant à des caches, parfaitement visibles dans les cendres noires. Résultats : les prospections ont permis de découvrir 9 tortues mortes et 17 vivantes, soit un taux de survie de 65,3 %.

- San Luen : les prospections ont été menées le 4 août 2006, 2 jours après le sinistre. Résultat : 31 tortues mortes et 2 vivantes, soit un taux de survie de 6 %.

- Mouresse : les prospections ont été menées le 4 juillet 2005, 2 jours après le sinistre. Résultat : 5 tortues mortes.

- Les Terres Gastes : les prospections ont été menées le 9 et le 12 juillet 2005, soit 4 et 8 jours après le sinistre. Résultat : 9 tortues mortes et 4 vivantes soit un taux de survie de 30 %.

- Les Rochers de Roquebrune : les prospections ont été menées le 7 juillet 2005, soit 6 jours après le sinistre. Résultat : 7 tortues mortes et 2 vivantes soit un taux de survie de 22.2 %.

De ces éléments, on peut conclure que la mortalité due au feu est importante (72,3 % si l'on cumule tous les sites) et qu'elle présente une forte variabilité, difficilement explicable à ce jour : effet date, intensité du feu, nature du site, etc.

Dans le cas des deux premiers incendies (plaine des Maures et Vallon du Pey) la différence entre les valeurs (77 % et 34,6 % de mortalité) semble attribuable à la période des incendies et aux conditions météorologiques de ces deux années. Le feu de la plaine des Maures a eu lieu en effet en fin d'été, au cours d'une année normale sur le plan climatique, tandis que le feu du vallon du Pey a eu lieu fin juillet, lors d'une année caniculaire (2003). On peut penser que les tortues étaient moins actives dans ce dernier cas, plus enfouies dans le sol, ce qui expliquerait leur meilleure survie. L'intensité du feu ne semble pas en cause, les deux feux ayant eu à peu de chose près la même violence (aucune végétation buissonnante intacte, aucune tache de végétation épargnée).

2.4 Effet des incendies sur les abondances en tortues

Pour cela, nous nous appuyons sur les suivis mis en place dans la plaine des Maures en 2006 (Cheylan et al., 2006), poursuivis en 2007 et 2008. De nouvelles méthodes de traitement des données (Royle, 2004) ont pu être utilisées pour mettre en évidence l'effet incendie sur les abondances de tortues.

Méthodologie

Echantillonnage

110 sites de cinq hectares ont été disposés de manière aléatoire sur l'ensemble de la plaine des Maures, en essayant d'utiliser des limites visibles (chemins, parcelles cultivées) pour permettre un meilleur repérage sur le terrain. Les sites échantillonnés ont été choisis pour leur homogénéité de biotope et de passage ou non du feu sur l'intégralité du site. Les 60 premiers sites ont été prospectés du 26 avril au 3 juin 2006, les

30 suivants du 29 avril au 28 mai 2007 et les 20 restants du 22 avril au 19 juin 2008 (figure 11).

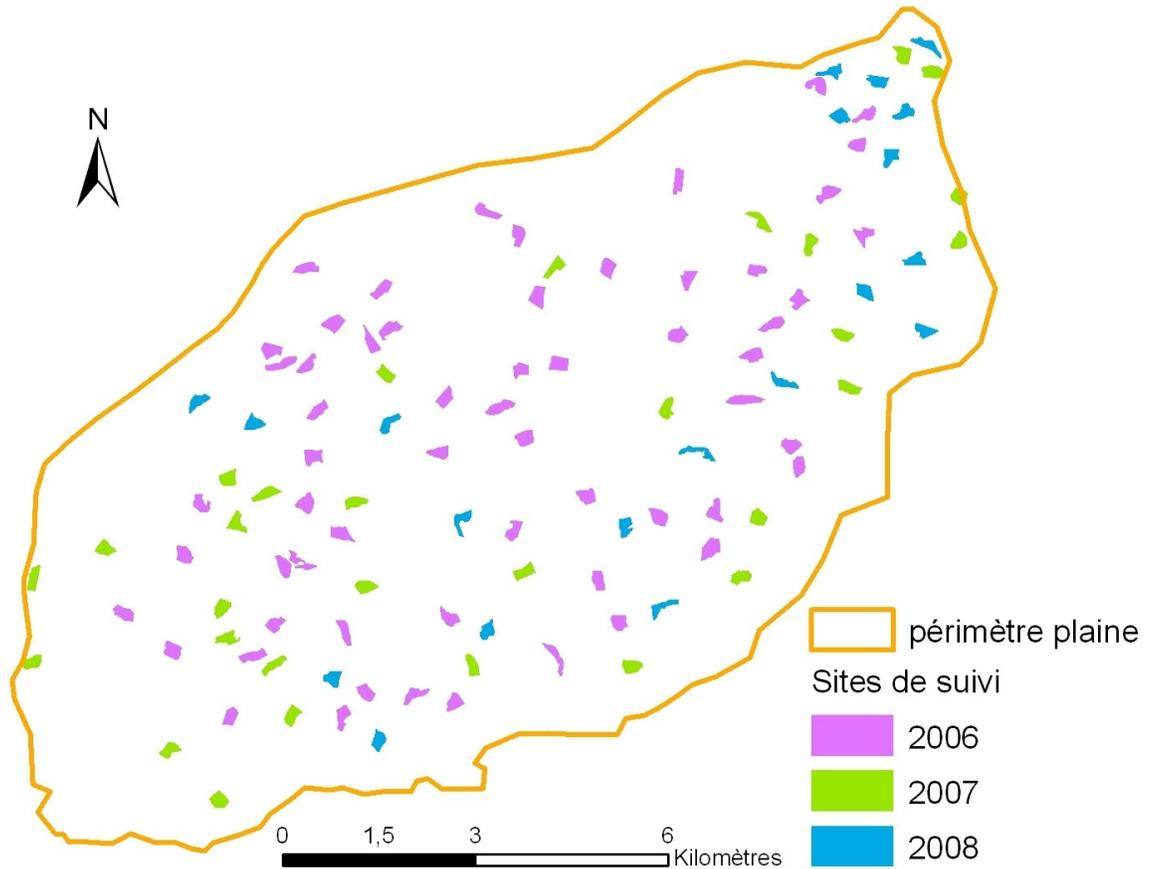


Figure 11 : Localisation des sites de suivi sur la plaine des Maures

Chaque site est parcouru à pied pendant une heure par un observateur. Ces prospections sont répétées 3 fois en veillant à espacer chacun des passages dans le temps. Elles sont réalisées en matinée lorsque les conditions météorologiques sont favorables à l'activité des tortues. Les parcours de prospection sont réalisés de manière aléatoire en veillant à couvrir l'ensemble du site.

Variable incendies

Pour chaque site, les passages d'incendies et leurs dates ont été renseignés par deux méthodes. La première consistait à rechercher sur le terrain la présence ou non de traces de feu sur l'écorce des chênes-lièges et sur divers végétaux (pins, genévriers).

Ces traces sont visibles pendant plusieurs dizaines d'années, plus de 30 ans pour les squelettes calcinés de genévriers. Elles permettent de vérifier de manière certaine si le site a brûlé dans son intégralité et d'évaluer l'ancienneté du feu. La deuxième méthode fait appel aux cartographies des incendies enregistrés dans le département du Var depuis 1958. Elle permet de donner un âge aux traces d'incendie observées sur le terrain.

Analyse des données

Les analyses ont été réalisées avec la méthode de Royle (Royle, 2004). Cette méthode s'applique au cas des espèces dont la probabilité de détection individuelle est inférieure à 1. Elle se base sur une réplification spatiale de comptages pendant une saison au cours de laquelle l'abondance pour chaque site est supposée constante. Cette méthode consiste à estimer la taille d'une population en tenant compte de la probabilité de détection individuelle. Deux variables sont donc prises en compte dans les modèles : la probabilité de détection individuelle (notée c) et l'abondance (notée λ).

Ici, les données utilisées sont le nombre de tortues contactées à chacun des 3 passages sur chaque site. Les abondances en tortues par site au cours de la saison d'étude sont considérées constantes.

Cette méthode permet de prendre en compte des paramètres pouvant agir sur les variables c et/ou λ (ces paramètres sont appelés des covariables du modèle). Les passages d'incendies ont donc été insérés dans les modèles comme covariables agissant sur l'abondance λ ; la probabilité de détection individuelle c étant supposée identique en zone incendiée et non incendiée.

Plusieurs modèles ont été construits. Un modèle constant qui ne prend pas en compte la covariable incendie sur les sites (absence de covariable), un modèle tenant compte du passage du feu sur le site, un modèle utilisant les dates d'incendies, un modèle plus simplifié regroupant les feux en deux catégories : feu récent (2003) ou feu ancien (1979, 1989), enfin, un modèle prenant en compte le nombre de passages du feu (aucun incendie, un incendie, deux incendies) sur les sites. Les deux derniers modèles ont également été testés en effet linéaire ce qui suppose un gradient linéaire des effets (dates ou fréquence d'incendies).

Ces modèles sont ensuite triés selon leurs valeurs d'AIC (Akaike's Information Criterion) (Akaike, 1974). Plus la valeur d'AIC est faible, mieux le modèle s'ajuste aux données. Les comparaisons des valeurs d'AIC obtenues pour chacun des modèles permettent de confirmer ou non les effets de ces covariables. Dans ces procédures, le meilleur modèle est celui qui présente la plus petite valeur d'AIC (Burnham et Anderson, 2002). Les analyses ont été réalisées avec le logiciel Présence (Hines, 2006).

Résultats

Le tableau 6 présente le nombre de sites échantillonnés en fonction des dates d'incendies. Au total, 60 sites n'ont pas connu de passage du feu au cours des 50 dernières années et 46 sites ont été incendiés au moins une fois. Compte tenu de l'étendue du feu de 1979, de nombreux sites (n=26) ont pu être attribué à cet incendie.

Tableau 6 : Echantillonnage des sites selon le passage ou non d'incendies

catégorie de site	nombre de sites (n)
incendié	46
non incendié	60
incendié en 1979	26
incendié en 1989	4
incendié en 2003	11
incendié en 1979 et 1989	5

Densités horaires moyennes en tortues

Au cours des 3 années, 318 heures de prospection ont été effectuées sur les 106 sites. Ceci a permis de contacter 642 individus, ce qui représente donc une moyenne de 2.02 tortues contactées par heure.

Les histogrammes (figure 12) indiquent les densités moyennes horaires en fonction des incendies. Ces densités relatives ne prennent pas en compte la probabilité de détection des individus mais elles permettent de dégager les premières tendances. On constate que, les densités horaires sur les zones incendiées sont 29.7% inférieures aux zones non incendiées, que les densités sur les zones incendiées en 1979 et en 2003 sont assez semblables, et que les densités sont fortes sur les secteurs incendiés en 1989, du

moins comparables à celles observées en zones non incendiées. Pour les sites brûlés deux fois, les densités sont par contre bien plus faibles.

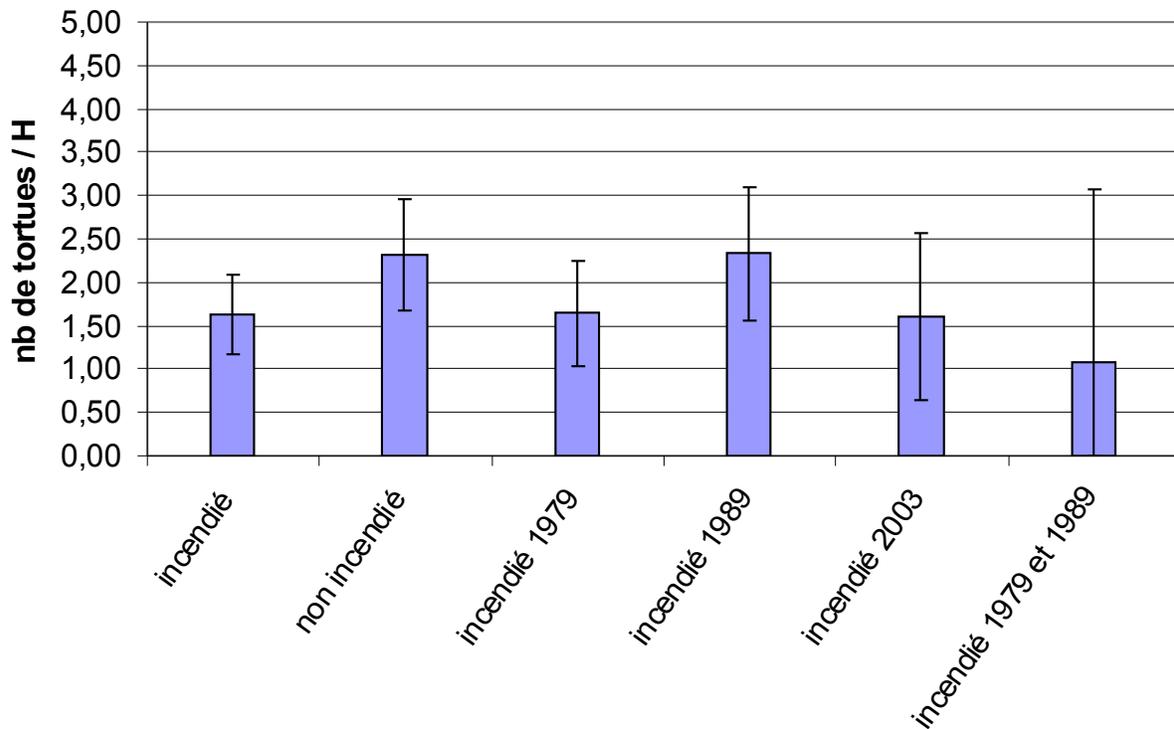


Figure 12 : densités horaires moyennes en tortues d'Hermann selon les passages d'incendies (accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95%).

Sélection de modèles

Le tableau 7 donne les différents modèles testés selon la méthode de l'AIC. Par rapport au modèle constant (sans prise en compte de covariable), la présence d'incendie (modèle « feu / pas feu ») améliore la valeur d'AIC de manière significative ($\Delta AIC=9.55$). Ceci permet de dire que l'incendie a un effet significatif sur l'abondance en tortues. Par contre, si l'on prend en compte l'ensemble des dates d'incendies (modèle « feu (79, 89, 03, 79+89) »), la valeur d'AIC est plus élevée ($\Delta AIC=-64.12$) ce qui suggère qu'il n'y a pas d'effet date. Cette forte valeur d'AIC pourrait être expliquée par le grand nombre de paramètres utilisés dans le modèle (nb paramètres=6).

Si l'on regroupe les incendies en deux classes (feu récent / feu ancien) on améliore le modèle constant ($\Delta AIC=5.61$) mais ce modèle s'ajuste moins bien aux données que le modèle « feu / pas feu » ($\Delta AIC=-3.94$). La prise en compte des dates

d'incendies selon un gradient linéaire améliore très légèrement le modèle « feu récent / feu ancien » mais cette différence n'est pas significative ($\Delta AIC < 2$). La valeur d'AIC associée reste supérieure à celle du modèle feu / pas feu. Ceci indique qu'il n'y a pas d'influence de la date de passage d'un incendie sur l'abondance en tortues.

Le meilleur modèle est celui qui prend en compte le nombre de feux (modèle « 0 feu / 1 feu / 2 feux »), avec un gain d'AIC de 2.23 par rapport au modèle « feu / pas feu ». L'effet est donc significatif. La valeur d'AIC est également améliorée si l'on force le modèle à être linéaire (modèle « 0 feu / 1 feu / 2 feux linéaire »), mais cette différence n'est pas significative ($\Delta AIC < 2$). Ceci indique que la répétition du passage du feu a bien un effet sur l'abondance en tortues.

Tableau 7 - Modèles testés et valeurs d'AIC obtenues

Modèle	nb paramètres	AIC	ΔAIC
0 feu / 1 feu / 2 feux linéaire	3	1269.82	0
0 feu / 1 feu / 2 feux	4	1270.9	1.08
feu / pas feu	3	1273.13	3.31
feu récent / feu ancien linéaire	3	1275.53	5.71
feu récent / feu ancien	4	1277.07	7.25
constant	2	1282.68	12.86
feu (79, 89, 03, 79+89)	6	1346.8	76.98

Abondances par site selon le nombre de feux (figure 13)

Sur les sites incendiés une fois, l'abondance en tortues est diminuée de 28.9% par rapport aux sites non incendiés. Sur les sites incendiés deux fois, cette abondance est à nouveau diminuée de 28.9% (soit 49.4% de tortues en moins par rapport aux sites non incendiés). Comme on peut le voir, les intervalles de confiance associés à ces estimations sont relativement élevés, ce qui tient probablement à des problèmes d'ajustement de la méthode de Royle à nos données.

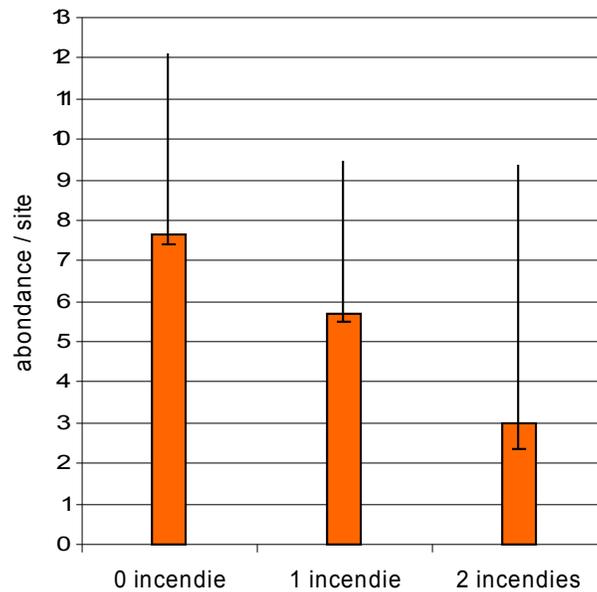


Figure 13 : Abondances en tortues selon la fréquence des incendies (résultats du modèle « 0feu, 1feu, 2feux linéaire »)

En conclusion, l'incendie agit distinctement sur les abondances en tortues. Il réduit significativement les densités dans les zones incendiées, son effet est cumulatif lors de feux répétés, le temps de retour à des densités « normales » (non incendié) est très long (plus de 28 ans). En revanche, l'année de l'incendie, c'est-à-dire son ancienneté par rapport à la période de l'étude, ne semble pas influencer sur les densités observées aujourd'hui.

2.5 Impact des incendies sur les structures démographiques

Pour faire suite aux résultats précédents, nous avons voulu savoir si les feux avaient une incidence sur les structures démographiques. Pour cela nous nous appuyons sur l'ensemble des observations effectuées dans la plaine des Maures de 2005 à 2007.

Méthode

Trois critères ont été utilisés : la taille des tortues, le sexe et l'âge.

La taille des tortues a été mesurée pour la quasi-totalité des individus rencontrés sur le terrain. Il s'agit de la longueur maximale de la carapace. Cette taille renseigne approximativement sur l'âge. Un autre paramètre qui influence la taille des individus est le sexe : les mâles sont plus petits que les femelles.

Le sexe des tortues peut facilement être déterminé à partir de la maturité sexuelle, c'est à dire à partir de huit-dix ans grâce à des critères de longueur de la queue, de forme du plastron (creusé chez les mâles), ainsi que de forme des écailles du plastron au niveau de la queue (Figure 14).



Femelle adulte



Mâle adulte

Figure 14 : Reconnaissance du sexe des tortues

Pour ce qui est de l'âge, celui-ci peut être estimé par lecture des lignes de croissance enregistrées sur l'écaillure (Figure 15) (Castanet & Cheylan, 1979). Bertolero *et al.* (2005) montrent que jusqu'à la maturité sexuelle, il est possible d'obtenir une bonne estimation de l'âge par cette méthode. A partir de la maturité sexuelle, la croissance diminue fortement, les lignes de croissance sont alors trop resserrées pour permettre une estimation correcte de l'âge. A partir d'un âge avancé (vers 15-20 ans), la croissance s'arrête et avec elle l'enregistrement de l'âge.

Selon ces critères, quatre catégories d'âge ont été retenues (Tableau 8). Les estimations des catégories d'âge ont été réalisées à partir des photographies des

tortues.



Figure 15 : Reconnaissance de l'âge des tortues à partir des écaillures.

Tableau 8 : Catégories d'âge établies et critères de reconnaissance.

Catégorie d'âge	Stade de développement	Critère de reconnaissance
1	Nouveau né (0-5 ans)	Nombre de lignes de croissance (entre 1 et 5)
2	Subadulte (5 - 8-9 ans)	Nombre de lignes de croissance (entre 5 et 8-9)
3	Jeune adulte (maturité sexuelle)	Lignes de croissance très rapprochées
4	Vieil adulte	Carapace lisse (disparition des lignes de croissance)

L'analyse repose sur 1 214 observations, spatialisées sur logiciel SIG à partir des coordonnées GPS prises sur le terrain et des cartographies d'incendies fournies par l'ONF.

Comme les données de taille ne sont pas distribuées selon une loi normale, des tests non-paramétriques ont été utilisés (test de Mann-Whitney). Les différences de fréquence de catégories d'âge entre zones incendiées et non incendiées ont été testées par un Khi-2. Les proportions de mâles et femelles en zones incendiées et non incendiées ont également été testées par un Khi-2. Ces analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R 2.5.1. (Ikaha & Gentleman, 1996).

Résultats

Sur les 1 214 tortues observées, 814 d'entre elles ont été rencontrées dans les zones non incendiées et 400 en zones incendiées.

Taille des tortues

Elle est légèrement supérieure en zone incendiée qu'en zone non incendiée (Figure 16) ce qui suggère une structure démographique significativement plus âgée en zone incendiée (test de Mann-Whitney unilatéral $U=79570.5$, $p=0.0003$).

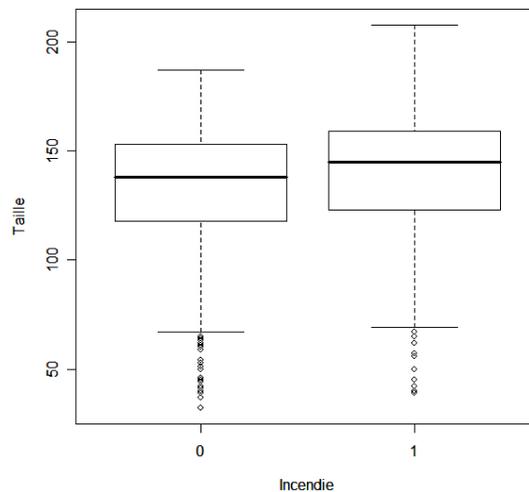


Figure 16 : Taille des tortues observées sur les zones non incendiées (gauche) ou incendiées (droite).

La figure 17 montre que cet accroissement de taille concerne surtout les individus de plus de 160 mm de longueur de carapace et plus encore les très grands individus ($>$ à 170 mm). Les classes juvéniles (entre 40 et 130 mm) sont systématiquement sous représentées dans l'échantillon « brûlé » par rapport à l'échantillon « non brûlé » hormis la classe 80-89 mm.

Comparaison des fréquences des tailles de tortues observées (mâles eclus) en zone brûlée et non brûlée

Impact des incendies sur la tortue d'Hermann

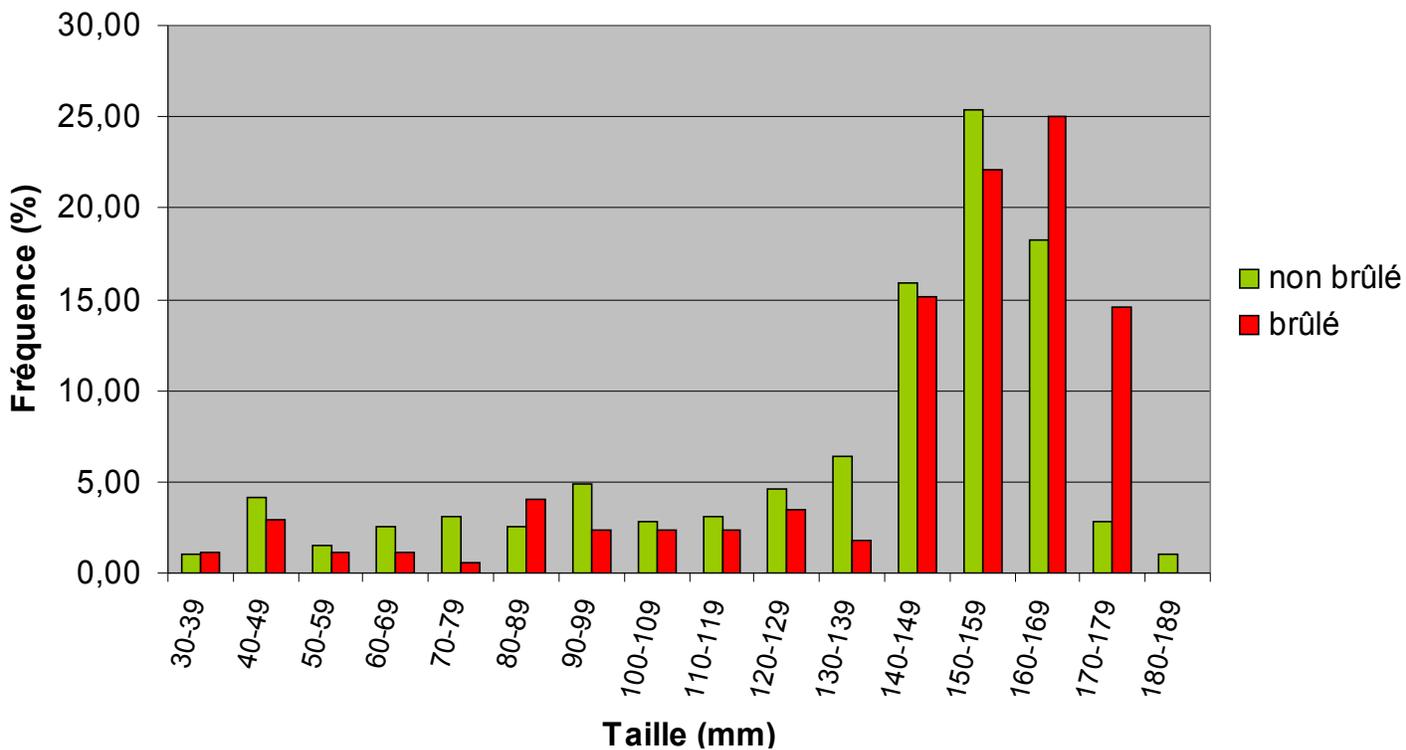


Figure 17 : répartition des tortues selon leur taille dans les zones brûlées (histogrammes rouges) et les zones non brûlées –histogrammes verts).

Age des tortues

Le test Khi-2 indique que les catégories d'âge sont différentes entre zones incendiées et non incendiées et ce, de façon très significative ($N = 970$, $X^2 = 49.85$, $df = 3$, $p\text{-value} = 8,62e\text{-}11$). L'examen de la figure 18 montre que les zones incendiées se singularisent par une surreprésentation de la catégorie d'âge 4, correspondant aux individus les plus âgés, et par une moindre fréquence d'individus jeunes (catégories 2 et 3). En revanche, la catégorie 1 (récemment nés) ne montre pas de différence entre zones incendiées et non incendiées.

Cette analyse par classes d'âge montre que les populations ayant subi un ou plusieurs incendies sont plus âgées que les populations jamais incendiées.

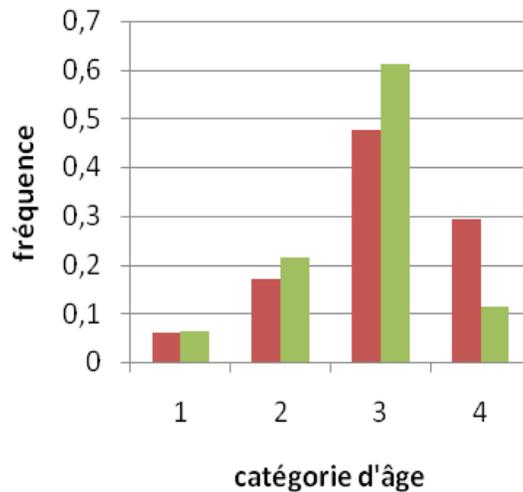


Figure 18 : Répartition des différentes catégories d'âge dans les zones ayant subi au moins un incendie au cours des 50 dernières années (rouge) et dans les zones non incendiées (vert).

Sex-ratio

Le test du Khi-2 n'est pas significatif ($N = 982$, $X^2 = 3.60$, $df = 1$, $p\text{-value} = 0.058$) ce qui indique que les proportions entre sexes sont statistiquement identiques entre zones incendiées et non incendiées. En revanche, le sex-ratio est dans les deux cas fortement déséquilibré en faveur des femelles (Figure 19).

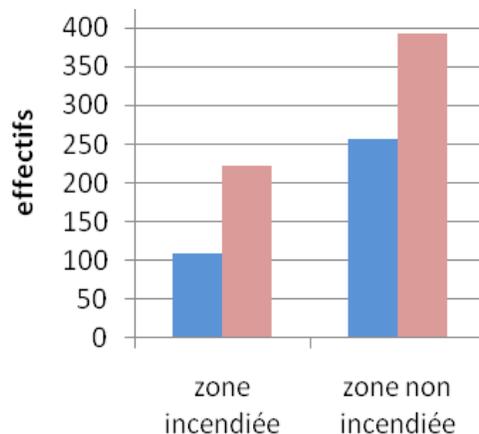


Figure 19 : Proportions de mâles (bleu) et de femelles (rouge) en zones incendiées et non incendiées.

Conclusion

L'étude des régimes d'incendies dans l'aire historique de l'espèce montre que les incendies forestiers ont touché 54% du territoire ces 48 dernières années, et 62,5% pour le seul secteur massif et plaine des Maures. Dans ce dernier secteur (le plus occupé par l'espèce), les zones incendiées 2 fois et plus représentent 36% du territoire et les zones incendiées 3 fois et plus 13,5% du territoire. Etant donné que les feux ne se distribuent pas au hasard mais selon des patrons bien définis, certaines zones brûlent en conséquence au moins tous les 20 ans, tandis que d'autres brûlent à une fréquence plus faible, comprise entre 50 et 100 ans. Ces rythmes de retour de l'incendie semblent largement incompatibles avec la survie de la tortue d'Hermann comme le montre la mise en coïncidence des deux distributions. On constate en effet que les noyaux actuels de présence de l'espèce se situent à peu de chose près dans les « trous » épargnés par le feu ces 50 dernières années. Les zones ayant subi 2 incendies et plus sont particulièrement touchées. Elles n'offrent en général plus aucune population viable de tortues, tout au plus quelques individus dispersés.

L'étude réalisée ces trois dernières années dans la plaine des Maures confirme cela. Elle indique des pertes d'effectifs d'environ 30% dans les secteurs incendiés une fois, et des pertes avoisinant 60% dans les zones brûlées 2 fois. Elles confirment également la prégnance du phénomène sur les populations puisque, près de 30 années après le feu de 1979, les densités de tortues restent près de 30% inférieures aux densités observées dans les zones non brûlées adjacentes.

Les prospections effectuées après feu pour estimer la mortalité due à l'incendie montrent que celle-ci est très importante - sans doute comprise entre 35 et 77% -, ce qui constitue des valeurs très hautes pour une espèce longévive à faible capacité de réponse démographique. Ces forts taux de mortalité expliquent sans doute pourquoi l'on observe encore cet effet sur les structures démographiques, 28 ans après le feu de 1979 dans la plaine des Maures. Nos études montrent également que les zones incendiées comportent plus de vieux individus et moins de jeunes, comparativement à des zones non touchées par le feu. Ce constat va dans le sens des observations faites

en Grèce par Hailey (2000) qui observe des taux de mortalité plus élevés chez les jeunes individus que chez les individus adultes. Ceci tient sans doute à la plus forte résistance des individus âgés, due à l'épaisseur de leur carapace, à une meilleure capacité à survivre après l'incendie, et à leur meilleure capacité à s'enfuir en période estivale. Des analyses démographiques fines s'avèreront nécessaires pour comprendre ces mécanismes.

Lors des études menées dans la plaine des Maures, nous avons pu constater que les proportions d'individus récemment nés sont identiques en zone incendiée et non incendiée. Ceci pourrait indiquer qu'après le passage des incendies, le taux de reproduction se rétablit pour revenir à des valeurs similaires à celui des zones non incendiées. Là encore, des analyses démographiques plus poussées seront nécessaires pour vérifier ces résultats. Hailey (2000) constate, 10 ans après feu, des proportions de jeunes identiques à celles observées avant feu.

Des suivis par capture-marquage-recapture seront particulièrement appropriés pour résoudre ces questions. Elles permettent en effet d'évaluer les probabilités de capture propres à chaque classe d'âge et de ce fait, d'appréhender les structures démographiques réelles, non déformées par la simple observation des individus.

Bibliographie

- Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, 716-23.
- Bertolero, A., Carretero, M.A. & Llorente, G. (2005) An assessment of the reliability of growth rings counts for age determination in the Hermann's tortoise *Testudo hermanni*. *Amphibia-Reptilia*, 26, 17-23.
- Burnham, K.P. & Anderson, D.R. (2002) *Model selection and Multi model Inference: A Practical Information Theoretic Approach*. Springer.
- Castanet, J. & Cheylan, M. (1979) Les marques de croissance des os et des écailles comme indicateurs de l'âge chez *Testudo hermanni* et *Testudo graeca* (Reptilia, Chelonia, Testudinidae). *Canadian Journal Zool.*, 57(8), 1649-65.
- Cheylan, M., Astruc, G., Besnard, A., Bertolero, A. & Pasquier, A. (2006). Mise en place d'un protocole de suivi à long terme des populations de tortues d'Hermann dans la plaine des Maures. Direction régionale de l'environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- Hailey, A. (2000) The effects of fire and mechanical habitat destruction on survival of the tortoise *Testudo hermanni* in northern Greece. *Biological Conservation*, 92, 321-33.
- Hines, J.E. (2006). PRESENCE2-Software to estimate patch occupancy and related parameters. USGS-PWRC.
- Ikaha, R. & Gentleman, R. (1996) R: A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5, 299-314.
- Royle, J.A. (2004) N-mixture models for estimating population size from spatially replicated counts. *Biometrics*, 60, 108-15.
- Stubbs, D., Swingland, I.R., Hailey, A. & Pulford, E. (1985) The ecology of the mediterranean tortoise *Testudo hermanni* in northern Greece : the effects of a catastrophe on population structure and density. *Biological Conservation*, 31(2), 125-52.

Rapports

- Gauthier, J. 2005 - Note de suivi post-incendie Tortue d'Hermann. Feu du vendredi 1 juillet 2005 à Mouresse (Vidauban).
- Gauthier, J. 2005 - Note de suivi post-incendie Tortue d'Hermann. Feu du vendredi 1 juillet 2005 au Rocher de Roquebrune (Le Muy et Roquebrune sur Argens).
- Gauthier, J. 2005 - Note de suivi post-incendie Tortue d'Hermann. Feu du mardi 5 juillet 2005 dans la forêt domaniale de Terres Gastes (Puget-sur-Argens, Var).
- Catard, A. 2006 - Rapport d'expertise post-incendie. Incendie du Muy du 2/08/2006. Site de San L

Illustrations



La Plaine des Maures, après l'incendie de 1979



La Plaine des Maures au printemps 2008, 29 ans après le feu de 1979.
Le chêne liège porte encore les traces du feu de 1979.



Plaine des Maures, Mouresse, premier printemps après feu.



Peyloubier, Feu de 2003, pris au printemps 2006



Tortue brûlée lors du feu de 1979, photographiée en 2006.