



L'IGNITION DES FEUX DE FORÊT PAR L'ACTION DE LA FOUDRE AU PORTUGAL DE 1996 À 2008<sup>1\*</sup> <sup>2\*\*</sup>

Lilian Pugno

NICIF - Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais  
[lilian.pugno@gmail.com](mailto:lilian.pugno@gmail.com)

Luciano Lourenço

Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra  
[luciano@uc.pt](mailto:luciano@uc.pt)

João Rocha

NICIF - Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais  
[joaorocha@nicif.pt](mailto:joaorocha@nicif.pt)

RÉSUMÉ

Une étude des incendies de forêt causés par la foudre est présentée pour le Portugal, de 1996 à 2008. A l'aide des données de tous les feux de foudre enregistrés sur cette période, une analyse de la répartition spatiale et temporelle, de ces phénomènes, a été effectuée. Les informations sur les feux de foudre ont été couplées à celles sur l'activité des décharges électriques atmosphériques (DEA) et aux conditions météorologiques. La moyenne mensuelle montre un maximum d'activité des DEA de Mai à Septembre, alors que le minimum d'activité est observé en Janvier et Décembre. Il existe une forte corrélation entre l'activité des DEA et la répartition des feux de foudre.

**Mots-clé:** feux de forêt; risque naturel; foudre; analyse spatiale; conditions météorologiques.

RESUMO

Apresenta-se um estudo sobre incêndios florestais em Portugal, causados por faíscas (raios) entre 1996 e 2008. Com base nos dados dos incêndios causados por faíscas, durante este período, procedeu-se a uma análise da sua distribuição espacial e temporal. As informações relativas aos incêndios causados por raios foram cruzadas com as referentes às descargas eléctricas atmosféricas (DEA) e às condições meteorológicas. A média mensal mostrou que o máximo da actividade de DEA ocorre entre Maio e Setembro e que o mínimo se observa entre Janeiro e Dezembro. Verificou-se uma forte correlação entre a actividade de DEA e a distribuição dos incêndios originados por faíscas. Estes concentram-se nas regiões montanhosas e ocorrem de Junho a Setembro.

**Palavras chave:** incêndios florestais; risco natural; faísca; análise espacial; condições meteorológicas.

ABSTRACT

A study of lightning-caused fire is presented for Portugal for the period 1996-2008. Based on records of all the lightning-caused fire, monthly and yearly trends have been made, in addition to spatial analysis. Data about fire have been crossed with the lightning activity and the weather conditions. The mean monthly variation shows maximum lightning activity between May and September, while minimum values are observed in January and December. There is a strong relationship between lightning activity and lightning-caused fire distribution

**Key words:** forest fire; natural hazard; lightning ignition; spatial analysis; weather conditions.

<sup>1\*</sup> O texto deste artigo corresponde à comunicação apresentada ao V Encontro Nacional e I Congresso Internacional de Riscos e foi submetido para revisão em 16-06-2009, tendo sido aceite para publicação em 19-02-2010.

Este artigo é parte integrante da Revista Territorium, n.º 17, 2010, © Riscos, ISBN: 0872- 8941.

<sup>2\*\*</sup> Cette étude correspond au travail réalisé pendant le stage au NICIF (Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais) de l'Université de Coimbra, du 16 Mars au 31 Juillet 2009.

## Introduction

Les feux de forêt sont considérés comme étant la principale source de perturbation des écosystèmes naturels, chaque année, le déclin de la biodiversité se fait un peu plus ressentir. Le Portugal est l'un des pays d'Europe le plus fortement exposé à la problématique des incendies de forêt (GOLDAMMER, 2002). Avec une couverture forestière d'environ 3,2 Mha, la prévention et la protection contre ces phénomènes naturels représentent un enjeu certain. La plupart des incendies de forêt sont d'origine anthropique. Jusqu'à présent méconnus, les incendies d'origine naturelle ayant comme source d'éclosion la foudre ont cependant touché très lourdement le pays en 2003. L'origine naturelle des feux de forêt est en majeure partie attribuée à la foudre (KOMAREK, 1964).

Dans le bassin méditerranéen, les incendies de forêt sont principalement perpétrés par l'activité humaine, de ce fait, une faible attention est portée aux feux d'origine naturelle. Quelques études ont vu le jour en Finlande, où la distribution spatiale des incendies de foudre dans la forêt boréale a été étudiée (LARJAVAARA et al., 2005), en Espagne, où la comparaison entre les feux d'origine anthropique et ceux d'origine naturelle a été établie, de manière à constituer des modèles pour chaque type d'incendie (VÁSQUEZ et MORENO, 1998). Cependant ce genre de phénomène n'a jamais été étudié au Portugal, ce qui peut porter préjudice à la sécurité civile, aux vues des larges incendies enregistrés en 2003. L'exemple le plus parlant est celui de l'incendie déclenché dans le district de Santarém (Poldro, Parioisse de Ulme, 2003) avec 22 190 ha brûlées (Table I).

L'estimation du risque de feu de forêt provenant de l'activité électrique dans l'atmosphère est très compliquée car l'ignition dépend de nombreux facteurs, comme l'humidité relative, la quantité de précipitation, la couverture végétale. Selon une étude américaine (RORIG et FERGUSON, 2002) les feux peuvent éclore malgré la présence de précipitation, si le taux d'humidité des combustibles est très faible. De plus des éclairs peuvent voir le jour sans précipitation associée, si l'orage est situé à haute altitude, la pluie s'évaporant avant d'avoir atteint le sol. En addition, des incendies peuvent avoir lieu en association avec des orages se déplaçant rapidement, quand de grandes quantités de précipitation ne s'accablent pas à un endroit précis (RORIG et FERGUSON, op. cit.).

Les objectifs de cette étude sont de représenter la répartition spatiale des feux de forêt dus à l'action de la foudre au Portugal de 1996 à 2008, période pour laquelle les informations sur leurs origines sont disponibles, et d'analyser les conditions météorologiques qui sont à l'origine de ces phénomènes, afin de déterminer

la probabilité d'ignition des feux par des décharges électriques atmosphériques (DEA). Les tendances annuelles, ainsi que les caractéristiques des feux de foudre et leur répartition géographique, ont donc été étudiées en parallèle avec la répartition des éclairs sur tout le territoire Portugais ainsi que les caractéristiques orographiques. Ce travail vise à une meilleure compréhension du phénomène, qui par l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), rendra compte des manifestations localisées dans un espace spécifique et facilitera les décisions à prendre sur cet espace.

## Méthodologie

Tout d'abord, ce travail est considéré comme un premier pas dans la recherche portugaise sur les feux de forêt dont la source d'ignition est l'action de la foudre. Ainsi, la littérature internationale a été soigneusement étudiée afin de mieux cerner le phénomène. Cette collecte bibliographique a permis de faire le lien avec la problématique portugaise. L'analyse méthodologique comprend trois aspects : la collecte des données, l'analyse spatiale et temporelle par l'utilisation du SIG et l'analyse statistique.

## Données

Les données sur les feux de forêt de cause naturelle ont été récupérées, pour la période de 1996 à 2008. Nous avons utilisé les informations fournies par l'Autorité Forestière Nationale (AFN), chargée de cataloguer toutes les occurrences de feux, quelles soient d'origine anthropique ou naturelle. Les données relatives aux archipels des Açores et de Madère, régions autonomes situées dans l'hémisphère Nord de l'océan Atlantique n'étaient pas disponibles. Les feux assimilés à la foudre ont été introduits dans une base de données et répertoriés par date, heure d'éclosion, localisation et surface brûlée par type de couverture végétale. Aucune limite de taille de feux n'a été imposée.

Afin de certifier cette base de données, les informations sur les activités électriques dans l'atmosphère ont été récupérées auprès de l'Institut de Météorologie de Lisbonne, ainsi que les conditions météorologiques, des plus proches stations disponibles, pendant les jours d'éclosion des incendies. Seules les frappes d'éclairs nuage-sol ont été prises en compte et croisées avec les données provenant de l'AFN.

Cependant, le réseau de détection des DEA n'a été mis en place qu'au cours de l'année 2002 au Portugal. Ainsi, l'analyse a été effectuée que sur la période de 2003 à 2008. Ce réseau est composé de quatre détecteurs IMPACT (*IMProved Accuracy from Combined Technology*)

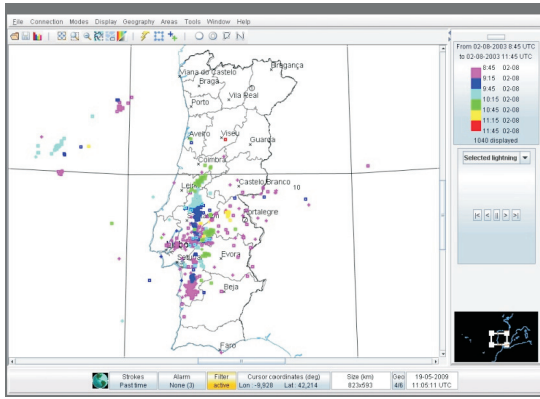


Fig. 1 - Logiciel permettant la localisation des éclairs sur le territoire portugais, et par la même occasion validant la cause de départ de feu.

situés à Braga, Castelo Branco, Alverca et Olhão qui mesurent l'intensité et la direction de la variation du champ magnétique terrestre, associé avec les éclairs. Les informations obtenues par les détecteurs sont envoyés à l'Institut de Météorologie par le biais de ligne électriques dédiées. Pour chaque incendie localisé, on fait correspondre les décharges électriques atmosphériques susceptibles de l'avoir déclenché (fig. 1). Les feux de forêt, ne coïncidant pas avec des frappes d'éclairs, ont été retirés de la base de données. On note 19 occurrences sur les 322 feux de forêts enregistrés qui ne sont pas dues à des DEA.

Les caractéristiques de la foudre ont été répertoriées selon l'année, le mois, l'heure, la localisation, l'intensité, le nombre de frappes et l'erreur relative. En ce qui concerne les conditions météorologiques, nous nous sommes intéressés à la localisation de la station, l'année, le mois, le jour, aux températures moyennes et maximales, à l'humidité relative, ainsi qu'à la quantité des précipitations.

**Cartographie**

Toutes les informations sur les feux de foudre et les conditions météorologiques à l'heure de l'éclosion des feux ont été incorporées dans une base de données géoréférencée pour une analyse spatiale. Le logiciel utilisé pour la cartographie est ArcGIS 9.1<sup>o</sup>. Le travail a été effectué en mode vecteur dans le système de projection Lisboa Hayford Gauss IGeoE (Transverse Mercator), le plus couramment employé. Le mode vecteur permet la représentation d'objets ayant une surface par leur contour (un polygone) et les autres par des lignes ou des points. Chaque point est décrit par ses coordonnées en X et Y et par un numéro d'identification qui est relié à la base de données.

Les principales divisions administratives portugaises sont les «distritos» (districts) qui se subdivisent en

«concelhos» (municipalités) et «freguesias» (paroisses). Les feux de foudre sont représentés sous la forme de points et constituent ainsi une couche d'information, à laquelle il est possible de superposer la couche des divisions administratives, celle des différentes classes hypsométriques afin de déterminer des tendances d'occurrence et par la même occasion mettre en évidence les zones les plus vulnérables.

**Analyse statistique**

L'exploitation de la base de données, relative à l'activité de la foudre et aux conditions météorologiques, a été effectuée à l'aide du logiciel d'analyse statistique SPSS. Différents graphiques ont été réalisés afin d'élucider la survenance des incendies de forêts. La comparaison des températures avec l'humidité relative et la quantité de précipitation à la date de l'incendie et sur une période de 15 jours avant l'incendie a servi à déterminer les conditions météorologiques favorables à l'éclosion des feux par la foudre.

L'état de l'art sur la situation portugaise concernant les feux de foudre a été élaboré par la création de graphiques renseignant sur la quantité de feux, la fréquence des feux, leur répartition temporelle. Il en est de même pour la foudre.

**Résultats**

Tendances pour la répartition temporelle des feux de forêt dus à l'action de la foudre et des décharges électriques atmosphériques

Pendant la période d'étude de 1996 à 2008, 303 feux de foudre ont été enregistrés (fig. 2), affectant 60 543,1 hectares (fig. 3). La moyenne annuelle des incendies provoqués par la foudre est de 23.

On observe une certaine variabilité dans la distribution selon les années (fig. 2). Le maximum d'occurrence est atteint en 2003, avec 67 feux, soit 22% des incendies enregistrés. Les années 1997 et 2005 sont les moins

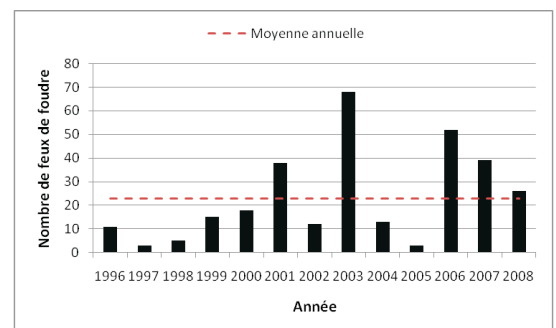


Fig. 2 - Répartition annuelle des feux de foudre de 1996 à 2008.

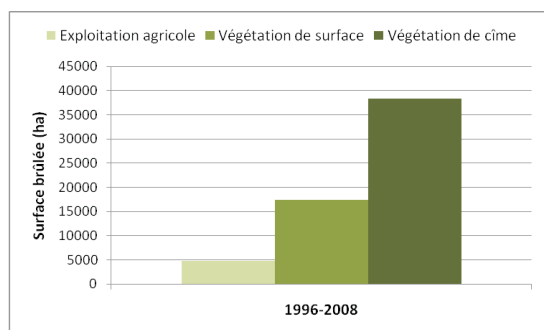


Fig. 3 - Quantité de surfaces brûlées de 1996 à 2008.

touchées, en ce qui concerne les feux de foudre (1%). On constate que la saison d'occurrence des feux est de Juin à Septembre, cette période concentre 92,4% des départs d'incendies (fig. 4), avec un maximum pour le mois d'Août, qui correspond à 36,3% du total de feux sur la période des 13 années d'étude.

De 1996 à 2008, le premier départ de feu a eu lieu le 4 Mars et le dernier le 10 Novembre. L'incendie de forêt, provoqué par la foudre, le plus conséquent est de 22 190 ha, la moyenne est de 200 ha, avec un minimum de 0,001 ha et une taille médiane de 1 ha. Aucune tendance dans la répartition de la taille des feux n'a été observée, tant les facteurs humains relatifs à la rapidité de détection, et à l'efficacité de la lutte lors de la première intervention, sont à prendre en compte dans le développement d'un incendie.

Sur 60 543,1 hectares de surface brûlée totale, 63,5% appartiennent à la catégorie de végétation de cime contre 29% à la végétation de surface et 7,5% aux exploitations agricoles (fig. 3).

Sur un total de 303 incendies déclenchés par la foudre, 10 ont brûlé une surface supérieure à 1000 hectares, dont 9 en 2003 (Table I). Cette année est exceptionnelle d'un point de vue des températures maximales atteintes, mais aussi de l'occurrence des feux qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. Durant cette année,

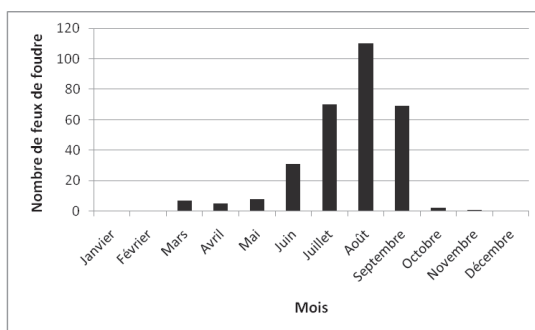


Fig. 4 - Répartition mensuelle des feux de foudre sur les 13 de la période d'étude.

les combattants du feu ont été largement dépassés par les événements, ce qui peut expliquer de telles surfaces brûlées (Lourenço, 2007), surtout durant la première quinzaine d'Août.

La distribution annuelle des DEA, nuage-sol, montre, au niveau de l'activité des éclairs, une forte variabilité en fonction des années (fig. 5), due à la variabilité des conditions synoptiques favorables à la formation de mouvements convectifs (SORIANO *et al.*, 2005). En effet, afin de se former, un orage doit vérifier les trois conditions suivantes :

- Instabilité atmosphérique ;
- Humidité élevée ;
- Situation provoquant l'ascension de l'air.

La période d'occurrence des feux de forêt, perpétrés par la foudre, s'étend du mois de Juin au mois de Septembre (fig. 4). La répartition mensuelle moyenne du nombre d'éclairs, au cours de la période 2003-2008, présente une valeur maximale pour les mois de Mai et Septembre, et les valeurs minimales sont observées en Janvier et en Décembre (fig. 6). La température de l'air à la surface du sol selon les mois de Mai à Septembre est très élevée en comparaison avec la période hivernale. Ainsi les mouvements convectifs sont favorisés durant la période estivale, ce qui entraîne une augmentation de la

TABLE I : Les 10 incendies de forêts, causés par la foudre, les plus destructeurs, en termes de surfaces brûlées.

Date	District	Municipalité	Pairie	V de cime (ha)	V de surface (ha)	Exp agr (ha)	Total(ha)
02/08/2003	Santarém	Chamusca	Ulme	13434,50	8462,50	293,00	22190,00
02/08/2003	Portalegre	Alter do Chão	Cunheira	5968,42	478,61	2015,01	8462,04
01/08/2003	Portalegre	Portalegre	Alegrete	3382,32	1609,02	1229,85	6221,18
02/08/2003	Santarém	Abrantes	Pego	2500,00	0,00	600,00	3100,00
02/08/2003	Setúbal	Grândola	Grândola	2390,00	0,00	0,00	2735,00
08/08/2003	Bragança	Vila Flor	Trindade	868,00	508,00	190,50	1566,50
25/08/2001	Guarda	Seia	Sazes da Beira	747,00	598,00	0,00	1345,00
02/08/2003	Évora	Montemor-o-Novo	Cabrela	1343,24	0,00	0,00	1343,24
02/08/2003	Setúbal	Santiago do Cacém	São Francisco da Serra	1305,00	0,00	0,00	1305,00
02/08/2003	Lisboa	Azambuja	Alcoentre	408,00	629,00	10,00	1047,00

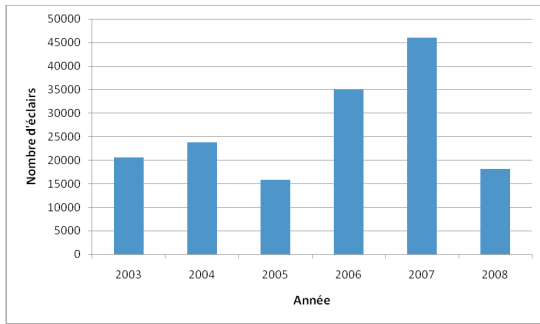


Fig. 5 - Activité des éclairs, par année.

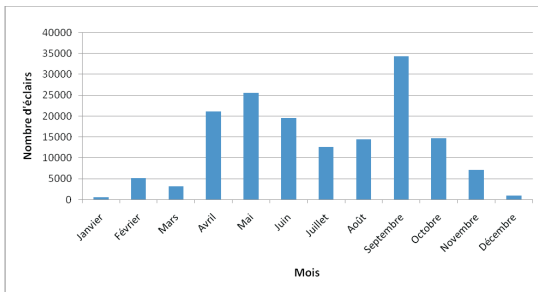


Fig. 6 - Variation mensuelle moyenne de la quantité d'éclairs sur le territoire portugais durant la période 2003-2008.

tendance orageuse et de ce fait, une augmentation de l'activité électrique atmosphérique.

On constate que la moyenne journalière du cycle des DEA, pour la période 2003-2008, atteint un maximum d'activité à 16h, et un minimum à 9h (fig. 7). Cette répartition est relative au cycle d'insolation journalier qui influence l'activité convective.

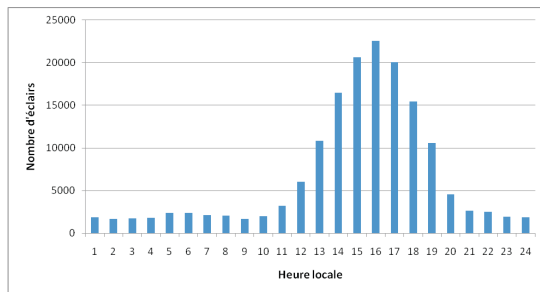


Fig. 7 - Variation moyenne de la quantité d'éclairs en fonction de l'heure, sur le territoire portugais pour la période 2003-2008.

L'activité des feux de foudre est donc étroitement liée à celle des DEA. En effet, 78,3% des DEA ont lieu entre Mai et Septembre, ce qui correspond à 95% des feux causés par des éclairs.

*Répartition spatiale des feux de forêt dus à l'action de la foudre et des décharges électriques atmosphériques*

La répartition spatiale générale des feux de foudre sur la période 1996-2008, est représentée sous la forme de points, et localisée par districts (18 au total) sur tout le

territoire portugais (fig. 8). La distribution des incendies diffère selon les zones géographiques. On constate une forte concentration dans la partie Nord-est du Portugal. En effet, les districts de Vila Real, Bragança, Viseu et Guarda regroupent 53% des feux, sur les 13 années de la période d'étude, pour seulement 24% de la surface du territoire. Le maximum d'occurrence étant pour le district de Vila Real avec 54 feux (= 4 feux/an) soit 17% de l'effectif total. Les régions Sud du Portugal sont moins touchées par ces phénomènes. Les districts de Lisboa, Setúbal, Evora, Beja et Faro concentrent 7,5% des incendies pour 34% du territoire. 56,6% des occurrences dans le Sud du Portugal ont été enregistrées en 2003, qui a été une année exceptionnelle du point de vue des conditions météorologiques. Il en est de même pour les districts de la côte atlantique (Viana do Castelo, Braga, Porto et Aveiro). En temps normal, ces régions sont faiblement sujettes aux feux de foudre. Ainsi, il est possible d'explicitier la vulnérabilité des différents districts vis-à-vis des phénomènes de feux de foudre.

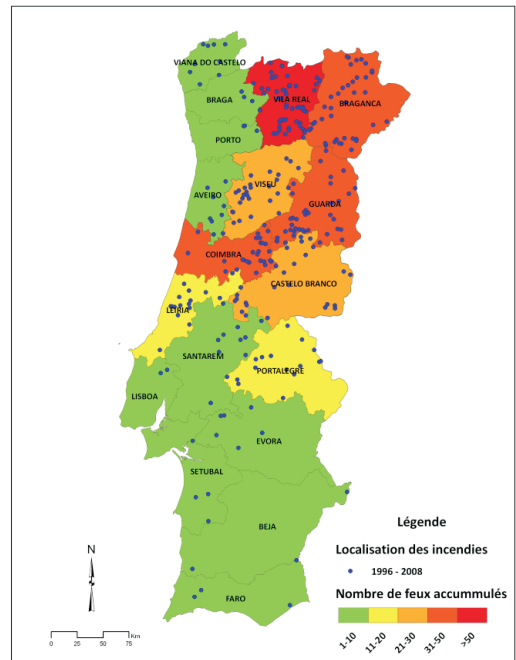


Fig. 8 - Répartition des feux de foudre par districts de 1996 à 2008.

Contrairement aux feux de forêt d'origine anthropique, répartis sur tout le territoire portugais (LOURENÇO, 2004), les incendies de foudre sont localisés dans les montagnes. L'idée que la répartition des feux de foudre est étroitement liée à l'orographie peut-être confirmée en calculant la densité d'incendies par classes hypsométriques (TABLE II). On obtient donc la tendance des feux en fonction de l'orographie (fig. 9 et 10). Le district de Coimbra illustre cette constatation. En

effet, cette région concentre 31 feux de foudre, dont seulement 6,5% sont situés à moins de 200m d'altitude et les 93,5% restants sont eux, situés dans le massif central entre Coimbra et Guarda.

En addition à l'influence du relief, on note une forte décroissance d'un point de vue de la densité des feux de foudre, du Nord vers le Sud. En appliquant la carte militaire du Portugal (fig. 9), qui découpe le continent en rectangles de surfaces équivalentes ( $10 \times 16 = 160 \text{ km}^2$ ), on obtient la fréquence des incendies causées par la foudre, de laquelle on calcule la densité grâce à l'équation:

$$\text{Densité (nFeux/an } 160 \text{ km}^2) = \frac{\text{Nombre de feux}}{T \times 160 \text{ km}^2}$$

Au Nord, la densité moyenne est de  $3,92 \cdot 10^{-4}$  feux/an ( $160 \text{ km}^2$ ), avec un maximum de  $3,36 \cdot 10^{-3}$  feux/an ( $160 \text{ km}^2$ ), atteint dans les districts de Vila Real. Dans le Sud, la densité moyenne est de  $6,97 \cdot 10^{-5}$  feux/an ( $160 \text{ km}^2$ ), avec un maximum de  $9,61 \cdot 10^{-4}$  feux/an ( $160 \text{ km}^2$ ), atteint dans le district de Santarém.

Le pic de valeur (fig. 9) est dû à la très faible surface que représentent les espaces situés entre 1300 et 1600 m d'altitude, au Portugal, en effet, 0,9% des feux éclatent dans ces zones, qui correspondent à 0,19% du territoire portugais. La majorité des feux (29,5%) ont lieu entre 400 et 700m d'altitude (fig. 9 et 12).

La répartition spatiale de la foudre sur le territoire portugais durant les mois de Juin à Septembre, pour la période de 2003 à 2008, selon les différentes côtes orographiques, montre que l'activité électrique

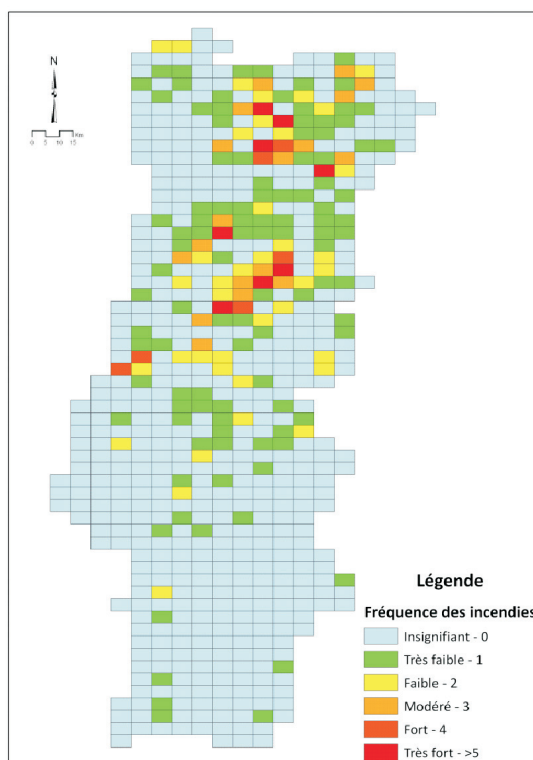


Fig. 9 - Représentation de l'indice de risque au Portugal, à l'aide d'une carte militaire, découpé en parcelle de  $160 \text{ km}^2$ .

L'apport d'air humide venant de l'océan atlantique favorise l'activité convective à l'intérieur des terres, et additionné au facteur orographique, les orages ont fortement tendance à se développer dans les chaînes de montagne proche de la frontière espagnole (fig. 13 B et C). La densité des éclairs diminue à proximité de la

TABLE II - Classement des feux de foudre par classes hypsométriques et indication de la densité (nbre de feux/surface de classes hypsométriques ( $\text{Km}^2 \cdot 1000$ ))

Altitude (m)	Nombre de feux	Incendies relatifs (%)	Surface ( $\text{km}^2$ )	Surface relative (%)	Densité ( $\times 1000$ )
0-50	11	3,6	8848,13	10,00	1,24
50-100	11	3,6	10088,99	11,40	1,09
100-200	31	10,2	19625,76	22,18	1,58
200-400	81	26,7	24382,30	27,56	3,32
400-700	89	29,4	16255,98	18,37	5,47
700-1000	68	22,4	7766,65	8,78	8,76
1000-1300	9	3,0	1303,75	1,47	6,90
1300-1600	3	1,0	167,27	0,19	17,93
1600-1800	0	0,0	46,53	0,05	0,00

atmosphérique est influencée par le relief, et joue un rôle prépondérant dans l'écllosion des feux de forêt d'origine naturelle. Sur cette période, les zones accueillant la plus forte partie des éclairs sont situées près de la frontière espagnole, dans les régions montagneuses.

côte atlantique, ce qui renforce l'idée que l'activité de la foudre est principalement concentrée dans les zones en altitude (fig. 13 A, B, C et F). En 2006 et 2007, la distribution de la foudre balaye tout le Portugal (fig. 13 D et E).



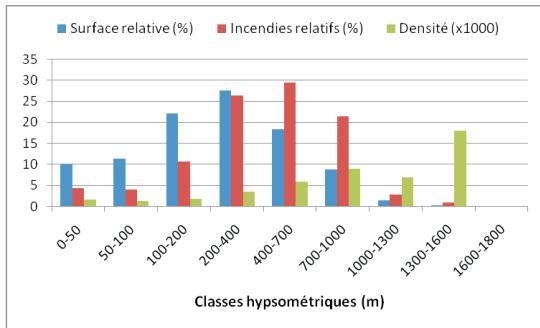


Fig. 10 - Comparaison de la proportion des feux de foudre, déclenchés dans les différentes classes hypsométriques, avec la surface relative de celles-ci et la densité.

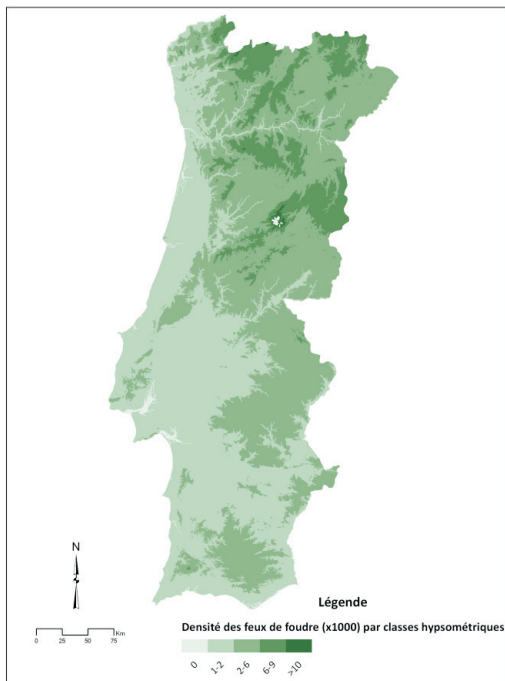


Fig. 11 - Densité de feux de forêts déclenchés par la foudre (nbre de feux/surface de la classe hypsométriques (Km<sup>2</sup>) x 1000) selon les différentes classes hypsométriques.

*Conditions météorologiques à l'origine de l'ignition des feux de foudre*

Les conditions météorologiques, en termes de températures maximales journalières, d'humidité relative et de précipitations journalières, pour la fin du mois de Juillet et le mois d'Août sont très favorables aux départs de feux. La période du 29 Juillet au 03 Août est la plus dangereuse, en 2003, elle a enregistré 51 grands feux de forêt (>100 ha) et 242 786 hectares brûlés (Lourenço, 2007). L'activité de la foudre a, elle aussi, été très importante (fig. 14). Ainsi, l'analyse des données météorologiques est effectuée du 15 Juillet au 31 Août, pour la période 2003-2008.

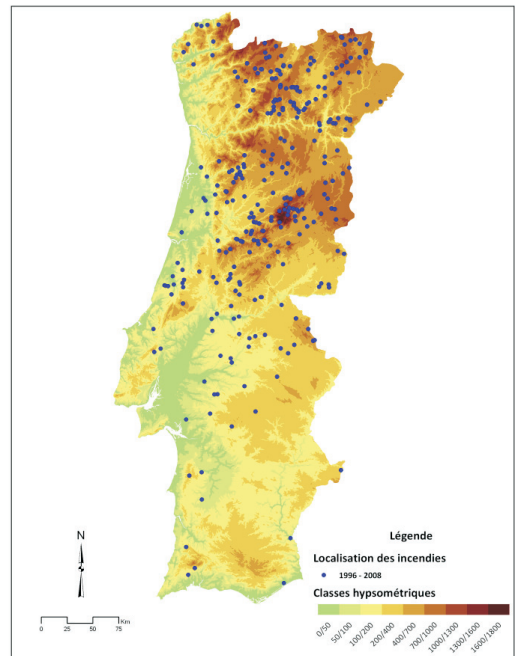


Fig. 12 - Répartition spatiale des feux de foudre en fonction des classes hypsométriques sur la période de 1996 à 2008.

Dans le district de Beja, situé au Sud du Portugal, les municipalités d'Odemira, sur le littoral, et de Moura, dans l'intérieur (fig. 15), sont étudiées. Les frappes d'éclairs sont représentées, afin de déterminer les caractéristiques d'éclosion des feux, spécifiques au Sud du Portugal.

La municipalité d'Odemira a été touchée par un incendie le 2 Août 2003, à 9h30. La température maximale avoisinait les 39,5°C et l'humidité relative était au minimum, 46%. C'est un phénomène orageux sans précipitations qui est à l'origine de ce départ de feux, avec 71 frappes de foudre, ce qui représente une forte activité électrique dans l'atmosphère. On assiste à une chute brutale de l'humidité (du 27 Juillet au 1er Août) accompagnée d'une hausse de la température les jours précédant l'incendie (fig.16).

A Moura, le départ de feu a eu lieu le 8 Août à 17h 30 sous une température de 41.2°C, une humidité relative de 32% et sans précipitations. Ce jour-là, la foudre a frappé à 9 reprises (fig. 17). On constate que les conditions météorologiques les jours précédant l'incendie sont similaires, de très fortes températures avec un faible taux d'humidité. Ce sont des conditions propices à la création d'orages secs, sources des incendies de foudre.

Il existe une différence de climat entre les deux municipalités, en effet, Odemira est soumise à un air plus humide provenant de l'océan atlantique, tandis que Moura, reculée dans les terres, proche de la frontière espagnole, accueille un climat plus sec.

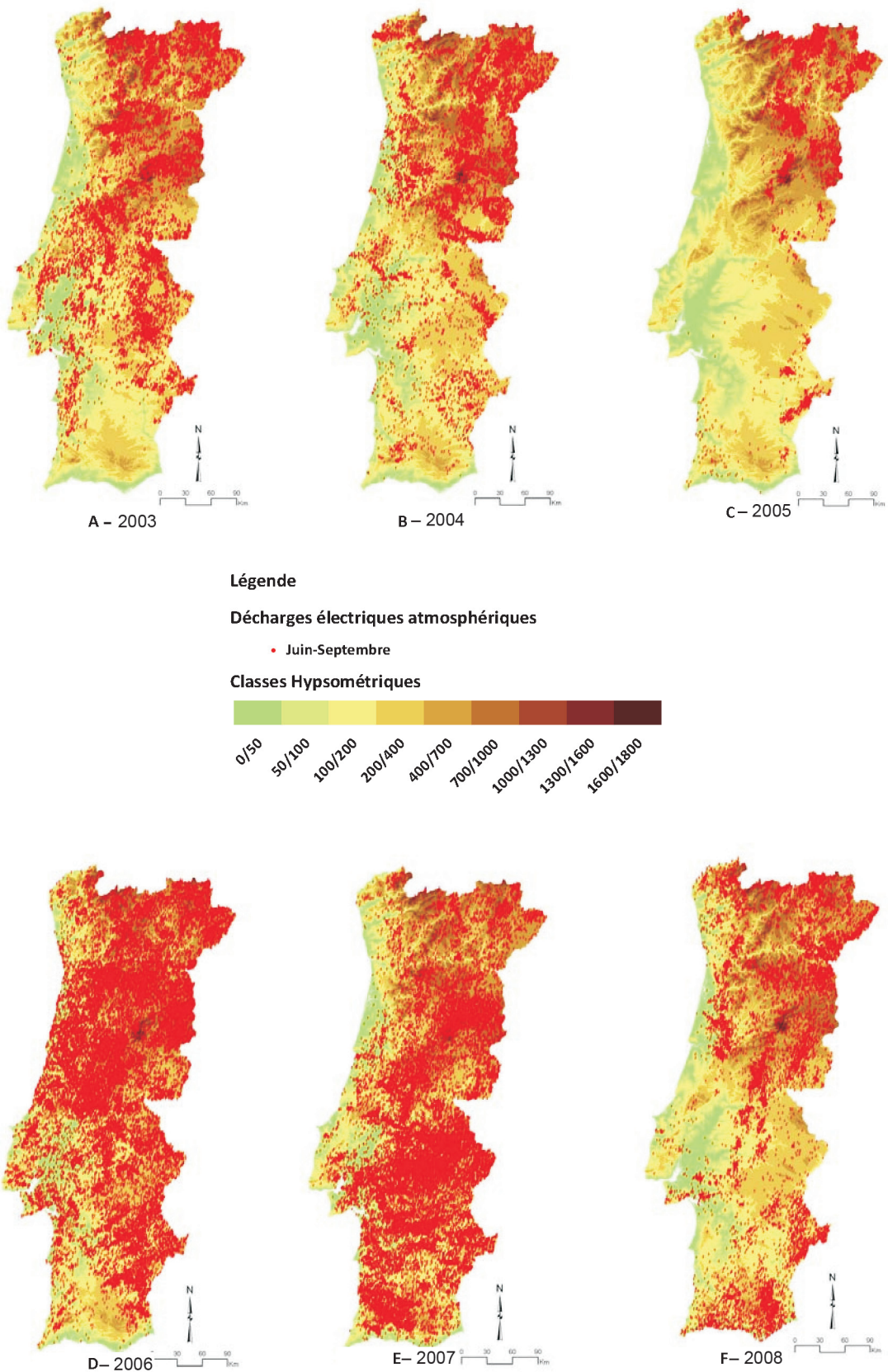


Fig. 13 - Distribution spatiale de l'activité de la foudre, de Juin à Septembre de 2003 à 2008, en fonction de l'orographie.



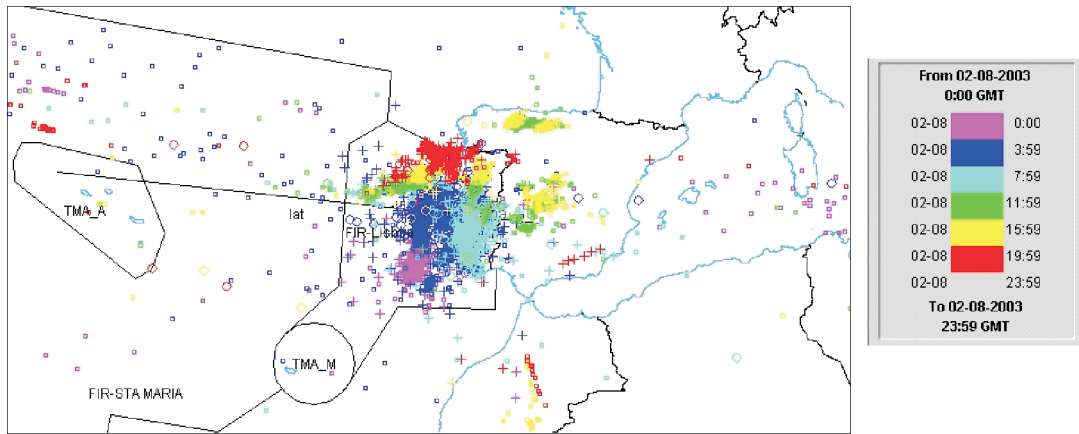


Fig. 14 - Distribution des décharges électriques provoquées lors des orages du 02 Août 2003 (Source: Institut de Métérologie, Portugal).



Fig. 15 - District de Beja, localisation (par un point) des stations météorologiques dans les municipalités d'Odemira et de Moura.

2 Août 2003 passe par une chute brutale de l'humidité qui précède l'écllosion du feu. Ce jour là, les données présentent une température maximale de 40.1 °C reliée à une humidité relative de 39% et 1 mm de précipitation. Il y eut 96 frappes de foudre (fig. 19).

Toujours au centre, mais proche de la frontière espagnole (fig. 20), le district de Castelo Branco présente un climat très sec en été, avec des températures extrêmes durant le mois d'août 2003. Le 7 Août 2003, il y eut 2 occurrences de feu au alentour de 17h dans la municipalité de d'Ianha-a-Nova, sous une température maximale de 41.2 °C, 24% d'humidité et 96 frappes d'éclairs, sans précipitation (fig. 21). La période du 28 Juillet au 15 Août est caractérisée par de très fortes chaleurs avec un taux d'humidité très faible. On constate de nombreux orages secs.

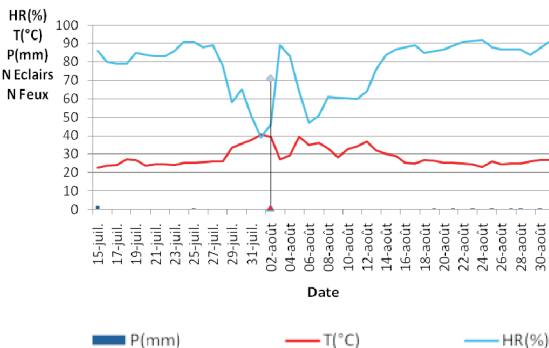


Fig. 16 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité d'Odemira du 15 Juillet au 31 Août 2003.

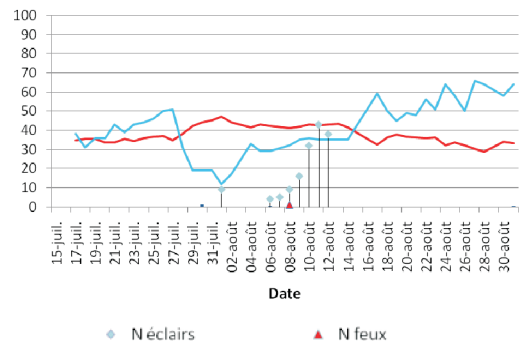


Fig. 17 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité de Moura du 15 Juillet au 31 Août 2003.

Dans la région Centre, le district de Santarém est le siège de quelques feux de forêt de grande ampleur (fig. 18). L'évolution de la situation météorologique, sur la municipalité de Chamusca, lors du grand feu de

Dans le Nord, les caractéristiques météorologiques pour les municipalités de l'intérieur, Bragança (district de Bragança) et Montalegre (district de Vila Real), situées au Nord-est du Portugal (fig. 22), déterminent que les

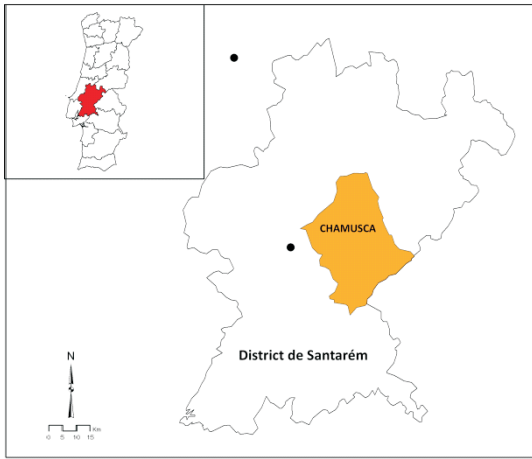


Fig. 18 - District de Santarém, localisation (par un point) de la station météorologique la plus proche de la municipalité de Chamusca.

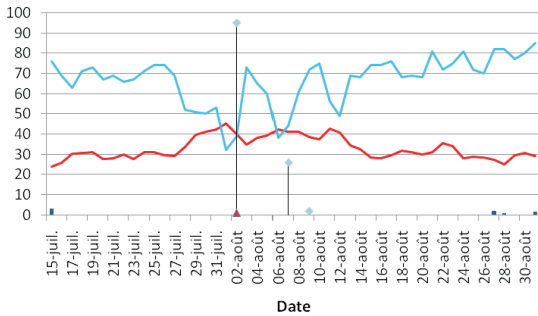


Fig. 19 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité de Chamusca du 15 Juillet au 31 Août 2003.



Fig. 20 - District de Castelo Branco, localisation (par un point) de la station météorologique dans la municipalité d'Idanha-a-Nova.

conditions d'éclosion des feux sont dues à la formation d'orages secs.

Pour Bragança, plusieurs incendies ont éclorés durant le mois d'Août, le 5, 6, 12 et 22 Août 2003. Cette période est caractérisée par des températures allant de 38,4°C à

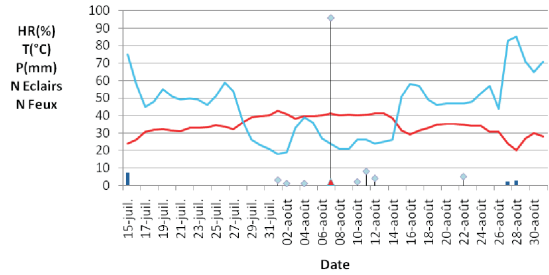


Fig. 21 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité d'Idanha-a-Nova du 15 Juillet au 31 Août 2003.

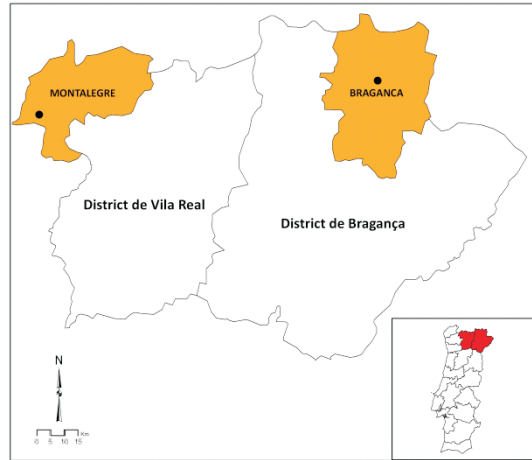


Fig. 22 - Districts de Vila Real e Bragança, localisation (par un point) des stations météorologiques dans les municipalités de Montalegre et de Bragança.

32,4°C, une humidité variant de 38% à 61%. La quantité de précipitation est de 9,7 mm le 22 Août, aucune précipitation pour les autres dates (fig. 23).

Pour Montalegre, les incendies sont concentrés le 12 Août avec 6 occurrences. La température maximale atteint 34,3°C, l'humidité relative étant de 40% avec 1,2 mm de précipitation. L'activité de la foudre est maximale le 12 Août avec 166 frappes (fig. 24).

Sur le littoral, l'influence de l'océan atlantique se confirme avec le district de Leiria, situé dans la région Centre-ouest du Portugal (fig. 25). En effet, on constate que l'humidité relative reste très élevée pour les mois de Juin et Juillet 2006. La chute du taux d'humidité est elle aussi suivie d'une augmentation de la température, du 10 au 15 Juillet, l'humidité relative diminue de 87% à 64%, la température croît de 29 à 39°C sur cette même période (fig. 26). La stabilité atmosphérique se trouve perturbée, ce qui engendre un orage sec le 18 Juillet à l'origine d'un feu de forêt à 14h13.

La température atteint 33,2°C avec une humidité de 75% et un total de précipitation de 1 mm.

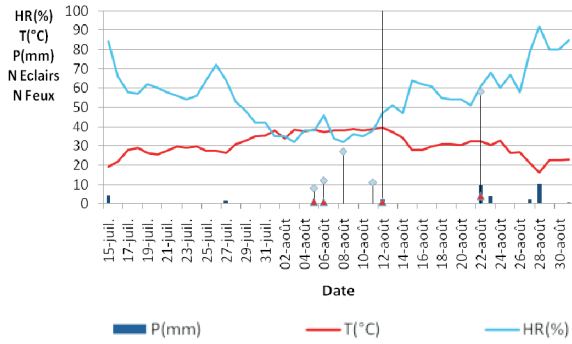


Fig. 23 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité de Bragança du 15 Juillet au 31 Août 2003.

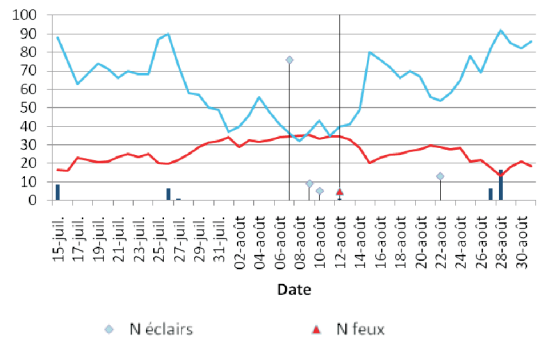


Fig. 24 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité de Montalegre du 15 Juillet au 31 Août 2003.



Fig. 25 - District de Leiria, localisation (par un point) de la station météorologique dans la municipalité de Leiria.

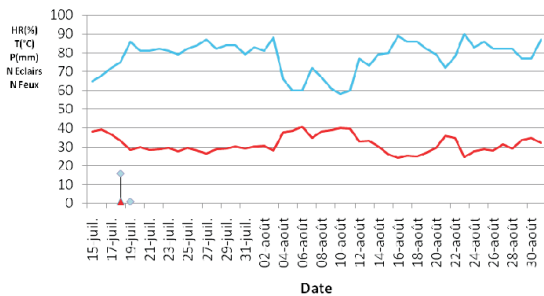


Fig. 26 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité de Leiria du 15 Juillet au 31 Août 2003.

31.1°C, une humidité relative de 80% et 20 frappes de foudre, sans précipitation (fig. 28).

Les feux de foudre sont, en majorité, dus aux orages secs. Ce phénomène a été très peu étudié au Portugal, il représente cependant un danger certain en ce qui concerne l'éclosion des incendies de forêt d'origine naturelle. L'analyse statistique des différentes données météorologiques du territoire portugais révèle une



Fig. 27 - District de Braga, localisation (par un point) de la station météorologique la plus proche de la municipalité de Vieira do Minho

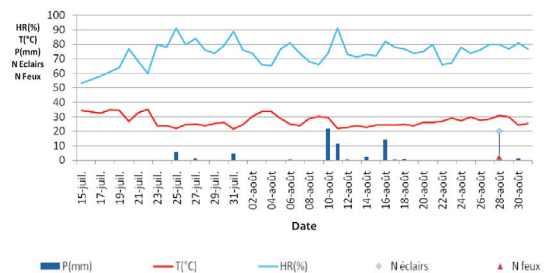


Fig. 28 - Evolution des températures maximales journalières, de l'humidité relative, des précipitations journalières, des occurrences des décharges électriques et des incendies de foudre sur la municipalité de Vieira do Minho du 15 Juillet au 31 Août 2003.

Au nord littoral, le paysage du Portugal est dominé par les zones montagneuses, peuplées de forêts sensibles aux éclairs. Le district de Braga situé sur la côte atlantique (fig. 27) possède un climat humide et fût le théâtre de 2 incendies la même journée sur la municipalité de Vieira do Minho, le 28 Août 2008. Les conditions météorologiques donnent une température maximale de

tendance très nette d'occurrence des feux dans les conditions suivantes:

- Présence de décharges électriques nuage-sol;
- Température: > 35 °C;
- Humidité relative: < 50 %;
- Précipitation: < 2 mm.

68

## Discussion

L'exode rural, durant la seconde moitié du 20ème siècle au Portugal, a mené à l'abandon des terres agricoles et contribué à l'augmentation de la vulnérabilité au feu. En effet, les pratiques pastorales permettaient de contrôler la quantité des combustibles végétaux (PEREIRA et al., 2005). Ces terres non entretenues se sont transformées selon un processus naturel, en forêts. Dans les forêts boréales de la Finlande, de la Russie et du Canada, les incendies déclenchés par la foudre peuvent être responsable de plus de 80% des surfaces brûlées (STOCKS et al., 1998; LARJAVAARA et al., 2005). Au Portugal, une étude a démontré que l'origine anthropique des feux surpassait celle naturelle (VASCONCELOS et al., 2001). Cependant, il serait dangereux de négliger leur potentiel destructeur.

Notre étude montre que la répartition géographique des feux de foudre est nettement concentrée au Nord-est et au Centre du Portugal. Ce sont des régions fortement exposées à l'abandon des terres agricoles. Une étude récemment menée dans la région d'Aragon au Nord-est de l'Espagne a démontré, une fois de plus, que la déprise agricole a engendré une forte concentration en combustible, terrain favorable aux incendies (AMATULLI et al., 2007). De plus, les pratiques ancestrales des cultures en terrasse dans les montagnes du Centre-est et Nord-est du Portugal sont désormais désuètes, leur rôle de zone tampon au feu, caractérisés par des discontinuités au niveau de la couverture forestière (LOURENÇO et al., 2006), n'est plus assuré. La reconquête végétale spontanée résultante est particulièrement inflammable,

durant la période estivale. Ces terrains deviennent alors propices à l'éclosion des feux de foudre. Les incendies de forêts provoqués par l'action de la foudre sont liés à l'absence d'activité humaine, en effet, l'influence de l'homme dans les zones élevées se fait moins ressentir et pourrait expliquer l'occurrence de tels phénomènes (MINNICH et al., 1993). Qui plus est, les zones en altitude accueillent plus de peuplements forestiers et arbustifs, que les régions basses. La très forte proportion de forêts brûlées, par les feux de foudre, corrobore ce fait.

La cartographie de l'activité des décharges électriques atmosphériques révèle une très forte tendance d'occurrence dans les chaînes de montagnes au Nord-est et centre du Portugal. Cette caractéristique est due au forçage orographique qui favorise la convection. La saison des feux de foudre est clairement répartie de Juin à Septembre, c'est selon ces mois-ci que la température à la surface du sol est la plus élevée. Les précipitations associées aux cellules orageuses ne dépassent que très rarement les 2 mm, ce qui induit des orages secs, fortement enclins à l'ignition des feux de forêts. Des résultats similaires ont été démontrés dans l'étude des feux de forêts perpétrés par la foudre en 2000, au Nord-ouest de l'Amérique (RORIG et FERGUSON, 2002). L'analyse de la quantité d'éclairs, moyenne mensuelle, sur la période d'étude de 2003 à 2008, n'aboutit pas sur des résultats similaires à l'étude espagnole (SORIANO et al., 2005), effectuée sur une période de 10 ans (1992-2001). La période de Juin-Septembre devrait concentrer la majorité de l'activité électrique atmosphérique. Néanmoins, en analysant année par année, on constate que les pics d'occurrence de la foudre s'accordent avec ceux des départs de feux (Table III). Le mois d'Août concentre 79 incendies de 2003 à 2008, dont 64 sur l'année 2003 (81%), relatifs à 9647 frappes de foudre (67%).

En 2003, les conditions extrêmes des températures expliquent un pic d'activité au cours du mois d'Août. On constate que le printemps et la fin de l'été concentrent la majeure partie des décharges électriques, ce qui est dû à l'instabilité atmosphérique, et 78,3% des

TABLE III: Comparaison de la quantité d'éclairs et du nombre de départs de feux associés sur la période de 2003 à 2008, selon les mois de Juin à Septembre.

	2003		2004		2005		2006		2007		2008	
	Eclairs	Feux	Eclairs	Feux	Eclairs	Feux	Eclairs	Feux	Eclairs	Feux	Eclairs	Feux
Jun	451	1	2533	11	4066	3	11443	8	327	0	749	1
Juillet	1	0	1165	1	6	0	9833	29	0	0	1628	9
...	9647	64	780	1	202	0	101	1	2209	4	1432	9
Septembre	838	0	4556	0	116	0	3293	13	19840	28	5619	6

frappes d'éclairs sont enregistrées entre le mois de Mai et celui de Septembre (fig. 29). En ce qui concerne l'année 2005, la faible activité des DEA peut-être reliée à l'intense sécheresse qui a touché le Portugal, étant donné l'activité convective, à la base de la création des orages, serait associée au forçage orographique et à la circulation des masses d'air chaud et humide.

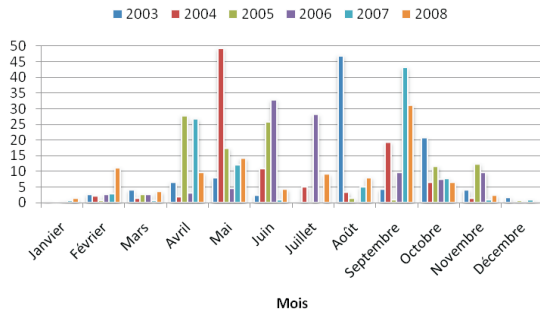


Fig. 29 - Variation annuelle des décharges électriques atmosphériques de 2003 à 2008.

Une classification des types de temps a été élaborée, pour le Portugal (TRIGO, 2000), ce qui a permis de relier l'occurrence moyenne des éclairs avec un certain type de circulation: durant la période Juin-Septembre, où l'activité des DEA est maximale, la circulation atmosphérique est dirigée par l'anticyclone des Açores, qui se déplace vers le Nord-Ouest, produisant des vents Nord et Nord-est (TRIGO, 2000; RAMOS et al., 2008).

Suite à ce travail, il serait intéressant d'analyser, en détail, les conditions synoptiques engendrant les manifestations de feux de foudre, sur la même période d'étude. De plus, les caractéristiques des éclairs comme l'intensité, la polarité et la durée des frappes, devrait être analysées et reliées aux différents événements enregistrés. Enfin, les espèces végétales, les plus vulnérables aux incendies causés par la foudre, n'ont pas été déterminées.

## Conclusion

Les feux de forêt d'origine naturelle sont essentiellement dus aux décharges électriques atmosphériques. Ce phénomène méconnu au Portugal a été analysé en utilisant les données de l'Agence Nationale des Forêts pour ce qui est des incendies, et celles de l'Institut de Météorologie de Lisbonne pour les informations relatives à l'activité de la foudre et aux conditions météorologiques à l'heure du départ de feu. La période d'étude s'étend sur treize années, de 1996 à 2008, et comporte 303 départs de feu de forêt perpétrés par l'action de la foudre.

La répartition temporelle et spatiale des feux de foudre a été étudiée et comparée avec celle des décharges électriques nuages-sol. Les données météorologiques

ont révélées les caractéristiques des orages secs, et permis d'établir des tendances d'occurrences de ces phénomènes. La saison des feux de foudre correspond aux mois de Juin à Septembre, ceux-ci ont une forte probabilité d'éclaire pendant l'après-midi, et sont clairement liés à l'orographie. L'absence d'activité humaine est elle aussi déterminante, en effet, les zones non entretenues regorgent de végétations particulièrement inflammables. Le type de temps favorables à l'ignition des feux de foudre correspondent à de fortes températures (>35°C), un faible taux d'humidité (<50%) et une absence de précipitation (<2mm).

Les régions à risque au Portugal sont surtout celles du Nord-est et du Centre, accueillant des collines et des montagnes favorables à la formation d'orages secs, durant la période estivale, et possédant une forte proportion de terres boisées. Le Sud du Portugal n'est soumis qu'à moindre mesure à un tel risque. Dans le futur, si se confirme l'hypothèse selon laquelle, le climat aura tendance à se réchauffer, les régions sujettes à une augmentation de la sécheresse se verront plus fortement exposées à l'activité de la foudre (PRICE, 2009). Cependant, les conséquences de l'évolution du climat en termes de température ou d'humidité, peuvent être atténuées par l'action de l'homme, particulièrement par la mise en place d'une politique de prévention visant l'élaboration de coupures combustible, la culture d'espèces résistantes au feu et la détermination des relations liant les feux de foudre avec la répartition des écosystèmes et des espèces végétales.

## Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à l'Instituto de Meteorologia et à l'Autoridade Florestal Nacional, du Portugal, pour fournir des données météorologiques et les statistiques sur les incendies de forêt, respectivement.

## Bibliographie

- AMATULLI, G.; PERÉZ-CABELLO, F. et DE LA RIVA, J. (2007) - «Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty». *Ecological Modelling*, 200, p. 321-333.
- GOLDAMMER, J. G. (2002) - «Toward International Cooperation in Managing Forest Fire Disasters in the Mediterranean Region». *International Forest Fire News*, No. 27 - July - December 2002, p. 81-89.
- KOMAREK, E. V. (1964) - «The natural history of lightning». *Third Annual Tall Timbers Fire Ecology Conference*, Tallahassee, Florida, p. 139-183.



- LARJAVAARA, M.; KULUVAINEN, T. et RITA, H. (2005) - «Spatial distribution of lightning-ignited forest fires in Finland». *Forest Ecology and Management*, 208, p. 177-188.
- LOURENÇO, L. (2004) - *Risco Meteorológico de Incêndio Florestal*, Colectâneas Cindinicas II, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra (FLUC), 188 p.
- LOURENÇO, L. (2006) - *Paisagens de Socalcos e Riscos Naturais em Vale do Rio Alva*, Colectâneas Cindinicas VI, NICIF, FLUC, 188 p.
- LOURENÇO, L. (2007) - «Incêndios florestais de 2003 e 2005. Tão perto no tempo e já tão longe na memória», *Riscos Ambientais e Formação de Professores*, Colectâneas Cindinicas VII, PROSEPE e NICIF, FLUC, p. 19-91.
- MINNICH, R. A.; FRANCO, V. E.; SOSA-RAMIREZ, J. et CHOU, Y. H. (1993) - «Lightning detection rates and wildland fire in the mountains of northern Baja California, Mexico». *Atmosfera*, 6, p. 235-253.
- PEREIRA, M. G.; TRIGO, R. M.; CAMARA, C. C.; PEREIRA, J. M. C. et LEITE, S. M. (2005) - «Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal». *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, p. 11-25.
- PRICE, C. (2009) - «Will a drier climate result in more lightning?». *Atmospheric Research*, 91, p. 479-484.
- RAMOS, R.; AMORIM, L.; CORREIA, S. et PRIOR, V. (2008) - «Using IMPACT sensors to study Lightning Climatology in Portugal». *Third International Symposium on Lightning Physics and Effects*, European COST Action P18.
- RORIG, M. L. et FERGUSON, S. A. (2002) - «The 2000 Fire Season: Lightning-Caused Fires». *Journal of Applied Meteorology*, Volume 41, p. 786-791.
- SORIANO, L. R.; PABLO, F. et TOMAS, C. (2005) - «Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula». *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, p. 1632-1639.
- STOCKS, B. J.; FOSBERG, M. A.; LYNHAM, T. J.; MEARN, L.; WOTTON, B. M.; YANG, Q.; JIN, J.; LAWRENCE, K.; HARTLEY, G. R.; MASON, J. A. et MCKENNEY, D. W. (1998) - «Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests». *Climatic Change*, 38, p. 1-13.
- TRIGO, R. M. et CAMARA, C. C. (2000) - «Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal». *International Journal of Climatology*, 20, p. 1559-1581.
- VASCONCELOS, M. J. P.; SILVA, S.; TOMÉ, M.; ALVIM, M. et PEREIRA, J. M. C. (2001) - «Spatial Prediction of fire ignition probabilities : comparing logistic regression and neural network». *Photogrammetr. Eng. Remote Sensing*, 67, p. 73-81.
- VÁSQUEZ, A. et MORENO, J. M. (1998) - «Patterns of Lightning-, and People-Caused Fires in Peninsular Spain». *Int. J. Wildland Fire*, 8(2), p. 103-115.