

ARTICLES

Émission des principaux composés organiques volatils biogéniques en France

Emission of the main biogenic volatile organic compounds in France

Laurent LUCHETTA, Valérie SIMON, Liberto TORRES*

Résumé

Une estimation des émissions biogéniques annuelles de composés organiques volatils (COV) non méthaniques dues à la couverture forestière en France a été réalisée. Trente-deux espèces d'arbres représentant 98 % de la forêt française ont été retenues pour l'estimation. Celle-ci a porté sur un réseau constitué de 93 mailles (départements) de 75 km × 75 km de dimensions moyennes. Nous avons affecté des taux d'émission et des densités de biomasse foliaire spécifiques à chacune des 32 espèces. Les variables micrométéorologiques (températures, intensités lumineuses) ont été collectées pour l'ensemble des départements français. Un effort a été fait pour utiliser, dans les algorithmes de calcul de « Guenther », des facteurs émissifs spécifiques aux espèces poussant en France ou bien dans les pays limitrophes de celle-ci. Sur les cinq années (1994-1998) de l'étude, nous avons calculé la moyenne annuelle des émissions d'isoprène, de monoterpènes et autres composés organiques volatils (ACOV) à l'échelle des départements et de la France. Sur le plan national, l'isoprène dont l'émission estimée est de 457 kt an⁻¹ représente environ 49 % de l'émission totale, alors que les monoterpènes avec 350 kt an⁻¹ et les ACOV avec 129 kt an⁻¹ représentent respectivement 37 % et 14 % du total. L'émission biogénique annuelle de COV en France représente sensiblement la moitié de la source anthropique. Cependant, dans certaines régions (méditerranéennes), les émissions naturelles peuvent largement dépasser durant certaines périodes les émissions anthropiques. Notons que l'ensemble de nos résultats demeure empreint d'une grande incertitude, puisque les estimations effectuées sont proposées avec des facteurs correctifs qui peuvent atteindre des valeurs comprises entre 4 et 7.

Abstract

An estimation of biogenic emissions of the main non-methanatic Volatile Organic Compounds (VOCs) due to the forest cover in France has been realized. 32 species representing 98 % of French forest have been considered for the estimation. The latter dealt on a net made of 93 irregular spatial grids (Departments) with an average size of 75 km × 75 km. We assigned emission rates and foliar biomass densities specific to each of the 32 species. The environmental variables (temperature, light intensity) have been collected for the whole of French Departments. A special effort was extended so as to use "Guenther's" calculation algorithms, and specific emitting factors to species growing in France or in bordering countries. Along the way of the five years (1994-1998) of the study we have calculated the yearly mean of isoprene, monoterpenes and Other Volatile Organic Compounds (OVOCs) emissions on the scale of the French Departments. At the national level isoprene emission is reckoned at 457 kt yr⁻¹ and represents nearly 49 % of the total emission, whereas monoterpenes with 350 kt yr⁻¹ and OVOCs with 129 kt yr⁻¹ represent respectively 37 % and 14 % of the total. The yearly biogenic emission of VOCs in France represents virtually half the anthropic source. However in some regions (Mediterranean area) natural emissions can widely exceed anthropic emissions during certain periods. Let's note the whole of our results remains tinged with a great uncertainty because the estimations carried out are presented with correction factors that can reach values comprised between 4 and 7.

* Laboratoire Chimie-Energie et Environnement. École Nationale Supérieure de Chimie. INP. 118, Route de Narbonne 31077-Toulouse Cedex France. E-mail : ltorres@ensct.fr

Introduction

Les composés organiques volatils (COV) non méthaniques d'origine biogénique ou anthropique peuvent jouer un rôle essentiel dans les processus photochimiques de pollution de l'air se produisant dans la couche limite atmosphérique. En présence de concentrations élevées d'oxydes d'azote (NO_x) et sous des conditions météorologiques particulières (ciel dégagé, fort ensoleillement, température et pression atmosphérique élevées), ils sont susceptibles d'être à l'origine de la formation dans la troposphère de fortes concentrations d'ozone et de toute une série de polluants plus ou moins réactifs : peroxy acetyl nitrate ou PAN, aldéhydes, cétones, acides, particules. Les principales émissions de COV anthropiques proviennent des combustions liées aux activités industrielles, aux transports, à la production d'énergie à partir des combustibles... Les COV émis par la végétation comportent un large éventail de produits comprenant principalement des hydrocarbures, parmi lesquels l'isoprène et les monoterpènes [1, 2] sont considérés comme étant les plus abondants et les plus réactifs dans les processus photochimiques. À l'exception de ces derniers, tous les autres composés organiques volatils (ACOV) biogéniques comprennent des sesquiterpènes mais surtout des familles de composés oxygénés (aldéhydes, cétones, alcools, acides...). Les estimations actuelles à l'échelle globale situent la source biogénique à environ $1\ 150\ \text{Tg}\ \text{an}^{-1}$ [3] alors que la source anthropique serait 10 fois plus faible [4, 5]. Les estimations biogéniques restent cependant très approximatives. Simpson [6] considère, dans un récent inventaire pour l'Europe, que la valeur calculée de l'émission de l'isoprène peut varier d'un facteur 5.

Les polluants gazeux, anthropiques et biogéniques émis dans l'atmosphère sont transportés par les mouvements atmosphériques, diffusent sous l'effet de la turbulence et sont soumis à des réactions chimiques et photochimiques. Par modélisation, il est possible de quantifier l'importance de ces différents processus (diffusion turbulente, transport advectif, évolution physico-chimique, importance relative des divers polluants, dépôt...). Cependant, l'utilité de ces modèles atmosphériques dépend de la qualité des paramètres d'entrée et, en particulier, de la fiabilité des données qualitatives et quantitatives sur les sources de polluants primaires introduits dans l'atmosphère. Or, malheureusement, si des efforts ont été faits en Europe ces dernières années pour inventorier, avec un certain succès, les émissions de COV d'origine anthropique [7, 8], très peu d'estimations ont été conduites sur les émissions biogéniques. À l'échelle nationale, quelques rares estimations d'émission ont été réalisées pour l'Espagne [9], le Royaume-Uni [10], la Grèce [11] et la Suisse [12]. En ce qui concerne la France, seuls Simpson et al. ont estimé l'émission isoprénique et des ACOV [6] et l'émission totale de COV [13] dans des études portant sur des inventaires biogéniques européens. En règle générale, les inventaires réalisés pour l'Europe aussi bien au

niveau national que continental ont été calculés avec des données tirées de la banque de données américaine BEIS [14, 15]. Des résultats récents démontrent que ces données ne sont pas toujours transposables aux espèces européennes. C'est ainsi, par exemple, que Benjamin et al. [16] classent *Quercus ilex* parmi les forts émetteurs d'isoprène, alors que des travaux récents démontrent que cette espèce est fortement émettrice de monoterpènes [17, 18]. Seuls Simpson et al. [13] ont essayé, sans y parvenir totalement d'ailleurs, d'attribuer aux espèces végétales représentatives de l'Europe, retenues dans leur inventaire, des paramètres d'émission spécifiques à ces espèces.

L'absence d'inventaire fiable des émissions biogéniques en France empêche de faire tourner les modèles prévisionnels de la pollution atmosphérique locale et régionale. Dans ce travail, nous avons entrepris de réaliser une estimation, aussi précise que possible, des émissions biogéniques dues à la couverture arboricole forestière française. Une attention particulière a été portée à la répartition géographique de ces émissions en prenant comme maille de référence, le département français. Cette étude porte sur l'estimation des émissions des hydrocarbures terpéniques (isoprène et monoterpènes) qui représentent de loin la source de COV la plus importante et des ACOV. Un effort particulier a été fait pour utiliser dans nos estimations des facteurs de calcul spécifiques aux espèces poussant en France ou bien dans des pays limitrophes de celle-ci. Nous avons voulu éviter, dans la mesure du possible, d'extrapoler à la France les facteurs d'émission déterminés pour les couverts forestiers aux États-Unis, en raison des différences climatiques, démographiques, géographiques et biologiques qui existent des deux côtés de l'Atlantique.

Le couvert forestier français

La France, avec $140\ 000\ \text{km}^2$ environ de forêts (Inventaire forestier national, (IFN) [19]), possède le potentiel émissif biogénique le plus important d'Europe hormis la Russie [13]. Les terres agricoles représentent 55 % du territoire, les espaces boisés (forêts, bosquets, peupleraies) occupent 29 % environ, le reste étant constitué par le bâti, les routes, les nappes d'eau, les zones rocheuses, les friches, les prairies... La forêt proprement dite représente 92 % des espaces boisés dont 58 % sont constitués par des feuillus, 26 % et 8 % par des résineux et des peuplements mixtes respectivement ; le reste est constitué par des bosquets, arbres épars et des peupleraies. Compte tenu de la superficie du pays qui est de $549\ 000\ \text{km}^2$, la résolution spatiale moyenne de notre estimation porte sur 93 grilles (départements) de $75 \times 75\ \text{km}$ de dimensions moyennes. Le tableau 1, ci-contre, répertorie les surfaces respectives des 32 essences retenues pour la réalisation de l'estimation de l'émission biogénique et qui représentent une couverture de 98 % de la surface forestière en

Tableau 1.

Surfaces forestières (ha) couvertes par les essences faisant partie de l'estimation et pourcentages respectifs.

Forest surface (ha) and corresponding percentage for each specie study in this estimation.

Essence (genre et espèces) nom latin	Essence nom français	Surface (ha)	Surface (%)
<i>Abies alba, pectinata et sibirica</i>	Sapins	565 828	4,2
<i>Acer campestre, opalus, monspessulanum, platanoïdes et pseudoplatanus</i>	Érables	22 234	0,2
<i>Alnus glutinosa, incana, cordata et viridis</i>	Aunes	82 485	0,6
<i>Betula pendula et nana</i>	Bouleaux	157 474	1,2
<i>Carpinus betulus</i>	Charme	197 569	1,5
<i>Castanea sativa</i>	Châtaignier	482 963	3,6
<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalyptus	2 054	0,0
<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre	1 291 624	9,5
<i>Fraxinus excelsior et ornus</i>	Frênes	357 331	2,6
<i>Larix decidua ou europaea</i>	Mélèze	95 889	0,7
<i>Picea abies ou excelsa</i>	Épicéa commun	739 942	5,5
<i>Picea sitchensis</i>	Épicéa de Sitka	48 433	0,4
<i>Pinus halepensis</i>	Pin d'Alep	241 104	1,8
<i>Pinus nigra-laricio</i>	Pin laricio	131 656	1,0
<i>Pinus nigra-nigricans</i>	Pin noir	178 728	1,3
<i>Pinus pinaster ou maritima</i>	Pin maritime	1 371 966	10,1
<i>Pinus pinea</i>	Pin pignon ou parasol	12 790	0,1
<i>Pinus sylvestris</i>	Pin sylvestre	1 124 243	8,3
<i>Pinus mugo</i>	Pin mugo	55 482	0,4
<i>Populus tremula, alba et nigra</i>	Peupliers	61 374	0,5
<i>Prunus avium et cerasus</i>	Merisier, griottier	32 559	0,2
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Sapin de Douglas	331 423	2,4
<i>Quercus cerris</i>	Chêne chevelu	562	0,0
<i>Quercus ilex</i>	Chêne vert, yeuse	299 431	2,2
<i>Quercus petraea ou sessiliflora</i>	Chêne rouvre	1 866 522	13,8
<i>Quercus pubescens</i>	Chêne blanc ou pubescent	892 729	6,6
<i>Quercus robur</i>	Chêne pédoncule	2 329 553	17,2
<i>Quercus suber</i>	Chêne-liège	64 789	0,5
<i>Robinia pseudo-acacia</i>	Robinier faux acacia	130 031	1,0
<i>Salix alba</i>	Saule blanc	60 904	0,4
<i>Tilia cordata et platyphyllos</i>	Tilleuls	34 761	0,3
<i>Ulmus campestris, scabra et laevis</i>	Ormes, ormeaux	6 668	0,0

France. Tous les renseignements concernant les types de formations végétales, leur cartographie, leur superficie, ainsi que les caractéristiques topographiques et climatiques des sites boisés, sont détaillées par l'IFN [19].

Méthodologie du calcul des émissions

Algorithmes

Guenther et al. [20-22] ont mis au point des expressions algorithmiques permettant de quantifier les émissions de COV à partir des biomasses foliaires d'écosystèmes forestiers et autres types de végétation. Le flux d'émission F ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) d'un COV pour une espèce végétale donnée est déterminé à l'aide de l'algorithme :

$$F = I D C \quad (1)$$

L'émission massique horaire EM ($\mu\text{g h}^{-1}$) d'un COV par une espèce végétale occupant un territoire de surface S (m^2) est donnée par la relation :

$$EM = F S \quad (2)$$

Dans ces expressions, I ($\mu\text{g g}^{-1} \text{poids sec h}^{-1}$) est le taux d'émission normalisé de l'espèce végétale considérée, déterminé, selon le type d'émission, à une température de référence de 30°C et un PAR (Photosynthetically Active Radiation) de référence de $1\,000 \mu\text{mol photons (400-700 nm) m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ou bien uniquement à une température de référence de 30°C , D est la densité foliaire ($\text{g poids sec m}^{-2}$), C est un facteur environnemental correctif sans dimension qui se présente sous deux formes différentes, selon qu'il s'applique à une émission biogénique fonction de la température foliaire et du PAR, ou bien à une émis-

sion uniquement fonction de la température foliaire. Si la température foliaire et la lumière (PAR) sont les paramètres déterminants de l'émission soit isoprénique, soit moins fréquemment monoterpénique, C prend la forme :

$$C_{L,T} = C_L C_T \quad (3)$$

où C_L et C_T sont des facteurs qui dépendent du PAR et de la température respectivement et dont les expressions sont :

$$C_L = \frac{\alpha C_{L1} L}{\sqrt{1 + \alpha^2 L^2}} \quad (4) \quad C_T = \frac{\exp \frac{C_{T1} (T - T_s)}{R T T_s}}{C_{T3} + \exp \frac{C_{T2} (T - T_M)}{R T T_s}} \quad (5)$$

Dans ces expressions, L est le PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ la constante des gaz parfaits et $\alpha = 0,0027$, $C_{L1} = 1,066$, $C_{T1} = 95\,000 \text{ J mol}^{-1}$, $C_{T2} = 230\,000 \text{ J mol}^{-1}$, $C_{T3} = 0,961$ et $T_M = 314 \text{ K}$ sont des coefficients empiriques. $T_s = 303 \text{ K}$ est la température foliaire de référence et T (K) la température foliaire expérimentale.

Si l'émission dépend essentiellement de la seule température foliaire, ce qui est le cas le plus fréquent des émissions monoterpéniques, C est exprimé par la relation :

$$C_T = \exp (\beta (T - T_s)) \quad (6)$$

où β est un coefficient empirique, T (K) est la température foliaire et $T_s = 303 \text{ K}$ la température de référence.

L'émission d'isoprène est étroitement dépendante de l'intensité lumineuse (PAR) et de la température foliaire. En revanche, on a longtemps considéré que l'émission de monoterpènes se produisait à la suite de processus de perméation-diffusion des hydrocarbures à partir de sites de stockage des monoterpènes situés dans la plante. De tels processus dépendent de la température des organes émetteurs. Or, des résultats récents démontrent que, pour certains végétaux, l'émission de monoterpènes est comme dans le cas des espèces émettrices d'isoprène, dépendante de la lumière (PAR) pour la biosynthèse et de la température pour l'émission [17, 23, 24].

Les algorithmes précédents, utilisés dans cette estimation, constituent à l'heure actuelle, la meilleure approche pour la détermination des émissions. Cependant, la valeur d'un inventaire dépend de la qualité et de la cohérence des différents facteurs figurant dans les expressions algorithmiques. L'idéal serait d'appliquer à chaque espèce végétale étudiée les facteurs d'émission qui lui sont propres et qui ont été déterminés dans les conditions naturelles auxquelles le végétal est soumis. Cette approche spécifique est difficile, non seulement en raison du nombre important d'espèces considérées mais aussi en raison du peu de données concernant les facteurs émissifs propres aux espèces poussant en France et en Europe. En effet, la plupart des travaux effectués sur les émissions biogéniques ont été réalisés aux États-Unis. Notre approche du calcul des émissions espèce par espèce a été possible grâce aux résultats

obtenus lors de récentes campagnes de mesures conduites, en général au sud de l'Europe et faisant partie de projets financés par la Communauté européenne (Eurotrac-Biatex, Step, Bema, FieldVOC...).

Facteurs d'émission

Nous avons fait le bilan des données soit existant dans la littérature, soit déterminées par nous-mêmes, nécessaires à la réalisation de cette estimation.

• **Taux d'émission normalisés** (I). À l'exception du travail réalisé par Simpson et al. [13], tous les inventaires d'émission biogénique réalisés en Europe ont été calculés avec des taux d'émission généralement déterminés hors Europe (données BEIS). Pour notre part, nous avons essayé d'attribuer un taux d'émission normalisé à chaque essence représentative du couvert végétal français. Nous sommes parvenus à déterminer ou à recenser les taux d'émission normalisés pour les 32 essences faisant partie de l'étude. Nous avons regroupé dans le tableau 2 tous les taux d'émission résultant d'études européennes de terrain ou de laboratoire. Les taux d'émission déterminés hors Europe concernant les espèces retenues ont également été recensés.

Parmi les taux d'émission figurant sur le tableau 2, 21 ont été normalisés par nous à 30°C car ils étaient normalisés par leurs auteurs à une température différente. À partir des résultats obtenus en France, en Europe et aux États-Unis, nous avons calculé un taux d'émission normalisé moyen par essence (Tableau 3, p. 395). Celui-ci est la moyenne arithmétique, lorsqu'elle peut être calculée, des taux d'émission recensés dans le tableau 2 concernant l'essence en question et sélectionnés selon les critères suivants :

Pour les émetteurs de monoterpènes, dont l'émission ne dépend en général que de la température, les taux d'émission choisis en priorité sont ceux qui ont été normalisés à 30°C , et à défaut, ceux qui ont été normalisés à 30°C et à un PAR de $1\,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Notons que certains des taux retenus, établis pour une température de 25°C et un PAR de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sont vraisemblablement sous-estimés. Pour *Quercus ilex*, *Picea abies* et *Fagus sylvatica* dont l'émission monoterpénique dépend à la fois de l'intensité lumineuse et de la température, les taux d'émission sont normalisés à 30°C et un PAR de $1\,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. L'émission de *Quercus coccifera* semble aussi présenter cette double dépendance. Rabong and Steinbrecher, Seufert et al., et Steinbrecher et al. [25-27] ont observé que *Quercus suber* émet des quantités insignifiantes de monoterpènes. Contrastant avec ces résultats, Pio et al. [28] trouvent des taux d'émission monoterpéniques compris entre 7 et $37 \mu\text{g g}^{-1} \text{ poids sec h}^{-1}$ à 25°C et un PAR de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ayant participé avec Seufert et al. et Steinbrecher et al. aux campagnes menées dans le cadre du projet BEMA [29] (Biogenic Emissions in the Mediterranean Area,

Tableau 2.
Taux d'émission normalisés ($\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1}) déterminés en Europe et aux États-Unis.
Emission potentials ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight h^{-1}) determined in Europe and USA.

Essence	Taux d'émission normalisé à 30 °C	Taux d'émission normalisé à 30 °C et 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	COV émis	Lieu	Période	Références
<i>Abies alba</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Abies sibirica</i>	15,52		monoterpènes			Isidorov 1992 [31]
<i>Acer campestre</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Alnus glutinosa</i>		3,44*	monoterpène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Alnus glutinosa</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Betula pendula</i>	0,3		monoterpène	Autriche	mai	König et al. 1995 [32]
<i>Betula pendula</i>	0,006		isoprène	Autriche	mai	König et al. 1995 [32]
<i>Betula pendula</i>	5,4		monoterpène	Finlande	mai-septembre	Hakola et al. 1998 [33]
<i>Betula pubescens</i>	0		monoterpènes			Hewitt et al. 1992 [34]
<i>Betula pubescens</i>		0	isoprène			Hewitt et al. 1992 [34]
<i>Carpinus betulus</i>	0,075		monoterpène	Autriche	mai	König et al. 1995 [32]
<i>Castanea sativa</i>		8,71*	monoterpène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Eucalyptus globulus</i>	1,7		monoterpène	Portugal		Nunes, Pio 1999 [35]
<i>Eucalyptus globulus</i>		32	isoprène	Portugal		Nunes, Pio 1999 [35]
<i>Eucalyptus globulus</i>		18	isoprène	Angleterre		Street et al. 1997 [36]
<i>Eucalyptus globulus</i>		70	isoprène	États-Unis		Guenther et al. 1994 [37]
<i>Eucalyptus globulus</i>		3	monoterpène	États-Unis		Guenther et al. 1994 [37]
<i>Fagus sylvatica</i>	0,47		monoterpène	Autriche	août	König et al. 1995 [32]
<i>Fagus sylvatica</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Fagus sylvatica</i>		21,7	monoterpène	France-Espagne	juin	Luchetta 1999 [38]
<i>Fraxinus excelsior</i>	0		monoterpènes			Hewitt, Street 1992 [34]
<i>Fraxinus excelsior</i>		0	isoprène			Hewitt, Street 1992 [34]
<i>Fraxinus excelsior</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Larix decidua</i>	0,4 à 16		monoterpènes			Isidorov et al. 1985 [39]
<i>Larix decidua</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Picea abies</i>		0,39	isoprène	États-Unis	mai-décembre	Kempf et al. 1996 [40]
<i>Picea abies</i>		3,57	monoterpène	États-Unis	mai-décembre	Kempf et al. 1996 [40]
<i>Picea abies</i>		3,22	isoprène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Picea abies</i>		0,45	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Picea abies</i>	0,98		monoterpène	Suède	avril-mai, septembre-octobre	Lindskog, Potter 1995 [42]
<i>Picea abies</i>	1,23		monoterpène	Suède	mai-octobre	Janson 1993 [43]
<i>Picea abies</i>	4,8		monoterpène	Italie		Knoppel et al. 1981 [44]
<i>Picea abies</i>	1,47		monoterpène	Scandinavie	été	Janson 1992 [45]
<i>Picea abies</i>		1,13	isoprène	Allemagne		Steinbrecher et al. 1997 [46]
<i>Picea abies</i>		2,49	monoterpène	Allemagne		Steinbrecher, Rabong 1994 [47]
<i>Pinus montana</i>	0,91		monoterpène	Bulgarie	juillet	Dutaur 1996 [48]
<i>Picea sitchensis</i>		7,4	isoprène	Angleterre	juin-juillet	Street et al. 1996 [49]

Tableau 2 (suite).
Taux d'émission normalisés ($\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1}) déterminés en Europe et aux États-Unis.
Emission potentials ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight h^{-1}) determined in Europe and USA.

Essence	Taux d'émission normalisé à 30 °C	Taux d'émission normalisé à 30 °C et 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	COV émis	Lieu	Période	Références
<i>Picea sitchensis</i>	0,8	1,14	monoterpène	États-Unis		Evans et al. 1982 [50]
<i>Picea sitchensis</i>		3,66	isoprène	États-Unis		Evans et al. 1982 [50]
<i>Picea sitchensis</i>		2-7,5	isoprène	Angleterre		Street 1995 [51]
<i>Picea sitchensis</i>			monoterpène	États-Unis		Evans et al. 1982 [50]
<i>Picea sitchensis</i>		2,7	isoprène	États-Unis		Evans et al. 1982 [50]
<i>Pinus alba</i>		9*	isoprène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Pinus halepensis</i>	0,15	0,11	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Pinus halepensis</i>			monoterpène	États-Unis		Corchnoy et al. 1992 [52]
<i>Pinus halepensis</i>			monoterpène	États-Unis		Winer et al. 1983 [53]
<i>Pinus nigra</i>		13,2*	isoprène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Pinus pinaster</i>	1,7	1,32	monoterpène	Portugal	juillet-septembre	Pio et al. 1997 [54]
<i>Pinus pinaster</i>			monoterpène	États-Unis		Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Pinus pinaster</i>	1,7		monoterpène	Portugal	été-hiver	Pio et al. 1996 [55]
<i>Pinus pinaster</i>	0,43		monoterpène	France	juin (pluie)	Simon et al. 1994 [56]
<i>Pinus pinaster</i>		8,16*	monoterpène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Pinus pinea</i>	1,3	< 0,01	monoterpène	Italie	mai-94	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>	2,8		monoterpène	Italie	juin-octobre 93	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>			isoprène	Italie	mai-octobre 94	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>	7,0-15,0		monoterpène	Italie	août-94	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>	7,4		monoterpène	Italie	juin-93	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>		< 0,01	isoprène	Italie	juin-93	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>	3,4		monoterpène	Italie	mai-94	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>		< 0,01	isoprène	Italie	mai-94	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>	2,2		monoterpène	Italie	juin-93	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Pinus pinea</i>	7,4		monoterpène	Italie	juin-93	Street et al. 1997 [36]
<i>Pinus pinea</i>	3,35		monoterpène	Italie	mai-94	Street et al. 1997 [36]
<i>Pinus pinea</i>	5,91		monoterpène	Italie		Owen et al. 1997 [57]
<i>Pinus pinea</i>	1,5		monoterpène	Italie	mai-94	Kesselmeier et al. 1997 [58]
<i>Pinus pinea</i>	1		monoterpène	Italie	mai-94	Kesselmeier et al. 1997 [58]
<i>Pinus pinea</i>	0,42		monoterpène	États-Unis		Corchnoy et al. 1992 [52]
<i>Pinus pinea</i>		1,53*	monoterpène	Portugal	mai	Pio et al. 1993 [28]
<i>Pinus pinea</i>		1,51*	monoterpène	Portugal	juin	Pio et al. 1993 [28]
<i>Pinus sylvestris</i>		2,4	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Pinus sylvestris</i>	22,51		monoterpène	Russie		Isidorov 1992 [31]
<i>Pinus sylvestris</i>	1,97		monoterpène	Suède	mai-octobre	Janson 1992 [45]
<i>Pinus sylvestris</i>	5,8		monoterpène	Italie		Knoppel et al. 1981 [44]
<i>Pinus sylvestris</i>	19		monoterpènes			Isidorov et al. 1985 [39]
<i>Pinus sylvestris</i>		3,42*	monoterpène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Pinus sylvestris</i>	1,47		monoterpène	Scandinavie	été	Janson 1992 [45]
<i>Pinus sylvestris</i>	0,79		monoterpène	Pays-Bas		Duyzer 1993 [59]
<i>Pinus sylvestris</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Pinus sylvestris</i>	1,4		monoterpène	Scandinavie		Janson 1993 [43]
<i>Pinus mugo</i>	0,9		monoterpène	Bulgarie	juillet	Dutaur 1996 [48]

Tableau 2 (suite).
Taux d'émission normalisés ($\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1}) déterminés en Europe et aux États-Unis.
Emission potentials ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight h^{-1}) determined in Europe and USA.

Essence	Taux d'émission normalisé à 30 °C	Taux d'émission normalisé à 30 °C et 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	COV émis	Lieu	Période	Références
<i>Populus tremula</i>	46,58		isoprène	Russie		Isidorov, 1992 [31]
<i>Populus tremula</i>	4,6		monoterpène	Finlande	mai-septembre	Hakola et al. 1998 [33]
<i>Populus tremula</i>		51	isoprène	Finlande	mai-septembre	Hakola et al. 1998 [33]
<i>Prunus avium</i>		0,04	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Prunus avium</i>	0,24		monoterpène	États-Unis		Winer et al. 1992 [60]
<i>Prunus avium</i>	0,18		monoterpène	États-Unis		Winer et al. 1989 [61]
<i>Prunus avium</i>	0,4		monoterpène	États-Unis		Arey et al. 1991 [62]
<i>Pseudotsuga menziesii</i>		1,09	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Pseudotsuga menziesii</i>		0,45	isoprène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	14,8		monoterpène	Italie		Knoppel et al. 1981 [44]
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,06		monoterpène	États-Unis		Lamb et al. 1985 [63]
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,07		monoterpène	États-Unis		Winer et al. 1982 [64]
<i>Quercus cerris</i>		< 0,2	isoprène	Italie	mai	Steinbrecher et al. 1997 [27]
<i>Quercus cerris</i>	3,1		monoterpène	Italie	juin	Owen et al. 1997 [57]
<i>Quercus cerris</i>		0	isoprène			Rabong, Steinbrecher 1995 [25]
<i>Quercus cerris</i>	0		monoterpènes			Rabong, Steinbrecher 1995 [25]
<i>Quercus coccifera</i>	18,7		monoterpène	France		Hansen, Seufert 1996 [65]
<i>Quercus coccifera</i>		21,7	monoterpène	France		Steinbrecher, Hauff 1996 [66]
<i>Quercus ilex</i>		7,91	isoprène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Quercus ilex</i>		0,23	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Quercus ilex</i>		17,5-11,5-17,7-15,2	monoterpène	France	juin	Kesselmeier et al. 1998 [24]
<i>Quercus ilex</i>		18	monoterpène	France	juin et septembre	Ciccioli et al. 1997 [67]
<i>Quercus ilex</i>		17-22	monoterpène	Italie	juin 93, mai-juin, octobre 93	Ciccioli et al. 1997 [67]
<i>Quercus ilex</i>		11,6*	monoterpène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Quercus ilex</i>	19,9		monoterpène	France		Hansen, Seufert 1996 [65]
<i>Quercus ilex</i>		16,7	monoterpène	Italie	mai	Kesselmeier et al. 1997 [58]
<i>Quercus ilex</i>		21,7	monoterpène	Italie		Bertin et al. 1997 [18]
<i>Quercus ilex</i>		20	monoterpène	Italie	juin	Street et al. 1997 [36]
<i>Quercus ilex</i>		14,7	monoterpène	Italie	mai	Street et al. 1997 [36]
<i>Quercus ilex</i>		22,8	monoterpène	Italie		Owen et al. 1997 [57]
<i>Quercus ilex</i>		0,09	isoprène	Italie		Owen et al. 1997 [57]
<i>Quercus ilex</i>		27,1	monoterpène	Italie	mai	Seufert et al. 1997 [26]
<i>Quercus ilex</i>		18,3	monoterpène	Bassin méditerranéen	juin	Street et al. 1996 [49]
<i>Quercus petraea</i>	0,86		isoprène	Autriche	septembre	König et al. 1995 [32]
<i>Quercus petraea</i>	0,46		monoterpène	Autriche	septembre	König et al. 1995 [32]
<i>Quercus petraea</i>		70	isoprène	laboratoire		Steinbrecher (com. pers.)
<i>Quercus petraea</i>		87	isoprène	Angleterre		Street et al. 1997 [36]
<i>Quercus petraea</i>		45	isoprène	Italie	mai (pluie)	Steinbrecher et al. 1997 [27]
<i>Quercus pubescens</i>		58,4-42-48,6	isoprène	France	juin	Kesselmeier et al. 1998 [24]
<i>Quercus pubescens</i>		90,7	isoprène	Italie	mai	Steinbrecher et al. 1997 [27]
<i>Quercus pubescens</i>		22,75	isoprène	France	juin-octobre	Hewitt et al. 1996 [68]

Tableau 2 (suite).
Taux d'émission normalisés ($\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1}) déterminés en Europe et aux États-Unis.
Emission potentials ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight h^{-1}) determined in Europe and USA.

Essence	Taux d'émission normalisé à 30 °C	Taux d'émission normalisé à 30 °C et 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	COV émis	Lieu	Période	Références
<i>Quercus robur</i>	30**	79,5**	isoprène	Russie	juin	Isidorov et al. 1985 [39]
<i>Quercus robur</i>			isoprène	Russie	juin	Isidorov et al. 1985 [39]
<i>Quercus robur</i>		24,42	isoprène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Quercus robur</i>		0,22	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Quercus robur</i>	51,88		isoprène	Russie		Isidorov 1992 [31]
<i>Quercus robur</i>		14,8	isoprène			Dilts et al. 1990 [69]
<i>Quercus robur</i>		21,6*	isoprène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Quercus robur</i>		40	isoprène	États-Unis		Guenther et al. 1994 [37]
<i>Quercus robur</i>	42,7		isoprène	Russie		Isidorov et al. 1985 [39]
<i>Quercus robur</i>						
<i>Quercus suber</i>		7,91	isoprène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Quercus suber</i>		0,23	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Quercus suber</i>		22,2*	monoterpène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Quercus suber</i>		0	isoprène	Italie		Rabong, Steinbrecher 1995 [25]
<i>Quercus suber</i>	0		monoterpène	Italie		Rabong, Steinbrecher 1995 [25]
<i>Quercus suber</i>		0	isoprène	Italie		Seufert et al. 1997 [26]
<i>Quercus suber</i>	0		monoterpène	Italie		Seufert et al. 1997 [26]
<i>Robinia pseudoacacia</i>		0,87	monoterpène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Robinia pseudoacacia</i>		3,76	isoprène	États-Unis	juillet-septembre	Benjamin, Winer 1998 [41]
<i>Robinia pseudoacacia</i>		12,5	isoprène	États-Unis		Lamb et al. 1984 [70]
<i>Robinia pseudoacacia</i>		11	isoprène	États-Unis		Winer et al. 1983 [53]
<i>Salix alba</i>		16,8*	isoprène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Salix fragilis</i>	12,33		isoprène	Russie		Isidorov 1992 [31]
<i>Salix nigra</i>		23,11	isoprène	États-Unis		Evans et al. 1982 [50]
<i>Salix phylicifolia</i>		32	isoprène	Finlande	mai-septembre	Hakola et al. 1998 [33]
<i>Salix phylicifolia</i>	0,33		monoterpène	Finlande	mai-septembre	Hakola et al. 1998 [33]
<i>Salix Sp.</i>		12,4	isoprène	États-Unis		Zimmerman 1979 [71]
<i>Tilia cordata</i>		< 0,1	isoprène	laboratoire		Steinbrecher et al. 1993 [30]
<i>Ulmus campestris</i>		1,65*	monoterpène	Portugal	printemps-été	Pio et al. 1993 [28]
<i>Ulmus</i>	0		monoterpènes			Guenther 1999 [72]
<i>Ulmus</i>		0	isoprène			Guenther 1999 [72]

* mesuré à 25 °C et à 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

** exprimé en $\mu\text{g g}^{-1}$ poids frais h^{-1} .

1997) au cours desquelles *Quercus suber* a été étudié, nous avons observé in situ l'absence d'émission terpénique de ce chêne. Dans notre estimation, nous avons donc considéré que *Quercus suber* n'était pas émetteur. Isidorov et al. [39] publient une fourchette de taux d'émission monoterpéniques comprise entre 0,4 et 16 $\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1} pour un groupe d'essences dont *Larix decidua*. Le taux d'émission calculé pour

Larix decidua dans cette estimation est la moyenne de ces valeurs extrêmes. Dans la mesure où cette espèce ne représente que 0,7 % de la surface forestière française, l'approximation ainsi faite a une incidence très faible sur l'estimation de l'émission globale.

Pour les émetteurs d'isoprène, dont l'émission est à la fois dépendante de la température et du PAR, nous avons retenu systématiquement les taux

Tableau 3.
Taux d'émission normalisés ($\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1}) et coefficient de variation correspondants
pour les espèces étudiées dans ce travail.

Average emission potentials ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight h^{-1}) and relevant variation coefficients
(calculated whenever possible from statistical data) for the species investigated in the present work.

Essence	Déterminés à 30 °C	Coefficient de variation (%)	Déterminés à 30°C et 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Coefficient de variation (%)	Références
<i>Abies alba</i>	15,5 (1) (m) E		< 0,1 (1) (i) E		[30, 31]
<i>Acer campestre</i>			< 0,1 (1) (i) E		[30]
<i>Alnus glutinosa</i>			*3,4 (1) (m) E		[28]
<i>Alnus glutinosa</i>			< 0,1 (1) (i) E		[30]
<i>Betula pendula</i>	2,9 (2) (m) E				[32, 33]
<i>Betula pendula</i>	< 0,01 (1) (i) E				[32]
<i>Carpinus betulus</i>	< 0,1 (1) (m) E				[32]
<i>Castanea sativa</i>			*8,7 (1) (m) E		[28]
<i>Eucalyptus globulus</i>	1,7 (1) (m) E		25,0 (2) (i) E		[35, 36]
<i>Fagus sylvatica</i>			21,7 (1) (m) F		[38]
<i>Fagus sylvatica</i>			< 0,1 (1) (i) E		[30]
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,0 (1) (m) E		< 0,1 (2) (i) E		[30, 34]
<i>Larix decidua</i>	8,2 (2) (m) E		< 0,1 (1) (i) E		[30, 39]
<i>Picea abies</i>	2,1 (4) (m) E	63,8	1,1 (1) (i) E		[42-46]
<i>Picea sitchensis</i>	0,8 (1) (m) US		5,6 (3) (i) E		[49, 50]
<i>Pinus halepensis</i>	0,4 (2) (m) US				[52, 53]
<i>Pinus nigra</i>			*13,2 (1) (i) E		[28]
<i>Pinus pinaster</i>	1,7 (2) (m) E				[54, 55]
<i>Pinus pinea</i>	4,7 (10) (m) E	69,5	< 0,01 (3) (i) E		[25, 26, 36, 58]
<i>Pinus sylvestris</i>	7,9 (7) (m) E	99,2	< 0,1 (1) (i) E		[30, 31, 39, 43-45, 59]
<i>Pinus uncinata</i>	0,9 (1) (m) E				[48]
<i>Populus tremula</i>	4,6 (1) (m) E		51,0 (1) (i) E		[33]
<i>Prunus avium</i>	0,3 (3) (m) US				[60-62]
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	14,8 (1) (m) E		0,5 (1) (i) US		[41, 44]
<i>Quercus cerris</i>	1,5 (2) (m) E		< 0,1 (2) (i) E		[25, 46, 57]
<i>Quercus ilex</i>			< 0,1 (1) (i) E		[57]
<i>Quercus ilex</i>			16,0 (5) (m) F	13,2	[24, 67]
<i>Quercus petraea</i>	0,5 (1) (m) E		67,3 (3) (i) E		[27, 32, 36]
<i>Quercus pubescens</i>			42,9 (4) (i) F	24,6	[24, 68]
<i>Quercus robur</i>	47,3 (2) (i) E		0,2 (1) (m) US		[31, 39, 41]
<i>Quercus suber</i>	0,0 (2) (m) E		0,0 (2) (i) E		[25, 26]
<i>Robinia pseudoacacia</i>			0,9 (1) (m) US		[41]
<i>Robinia pseudoacacia</i>			9,1 (3) (i) US		[41, 53, 70]
<i>Salix alba</i>			*16,8 (1) (i) E		[28]
<i>Tilia cordata</i>			< 0,1 (1) (i) E		[30]
<i>Ulmus campestris</i>			*1,7 (1) (m) E		[28]

* Déterminés à 25 °C et 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Le nombre de valeurs retenu par essence pour le calcul du taux d'émission est donné entre parenthèses. Dans quelques cas, des taux d'émission normalisés moyens ont pu être calculés ainsi que leurs coefficients de variation.

(i) taux d'émission calculés pour l'isoprène ; (m) taux d'émission calculés pour les monoterpènes. E : Europe ; F : France ; US : États-Unis.

d'émission normalisés à 30 °C et à un PAR de 1 000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Toutefois, pour *Pinus nigra* et *Salix alba*, nous avons été obligés d'utiliser, faute de données, les taux d'émission établis à 25 °C et un PAR de 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Pour *Quercus robur*, le taux d'émission isoprénique retenu a été déterminé à 30 °C. Sur les 32 taux d'émission normalisés figurant dans le tableau 3, nous avons retenu prioritairement ceux qui concernent des arbres poussant en France ou en Europe. Cependant pour *Prunus avium*, *Pinus*

halepensis, *Picea sitchensis*, *Quercus robur*, *Robinia pseudoacacia* (émetteurs de monoterpènes), *Pseudotsuga menziesii* et *Robinia pseudoacacia* (émetteurs d'isoprène), nous avons, faute de données européennes, retenu les taux d'émission déterminés aux États-Unis. Remarquons qu'à l'exception de *Robinia pseudoacacia*, les taux d'émission de ces essences sont inférieurs à 1 $\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1} , donc très faibles, et que leurs

surfaces cumulées ne représentent que 5,4 % de la surface forestière française.

Pour les émetteurs des ACOV, peu de résultats existent aujourd'hui. Les quelques taux d'émission déterminés en Europe sont très hétérogènes et souvent inférieurs à ceux déterminés aux États-Unis [60-73]. La gamme des taux publiés, se situe en général entre 0,5 et 5 $\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1} . En l'absence de résultats suffisamment nombreux et fiables, il nous a semblé raisonnable de retenir, ainsi que l'on fait Guenther et al. et Simpson et al. [13, 37], un taux d'émission normalisé de 1,5 $\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec h^{-1} commun à l'ensemble des ACOV. Bien que l'impact des paramètres micrométéorologiques et physiologiques sur l'émission des ACOV ne soit pas bien connu pour l'heure, l'algorithme de Guenther, fonction uniquement de la température, a été appliqué au calcul des émissions des ACOV dans notre estimation.

Observons qu'un grand nombre de taux d'émission normalisés retenus ont été déterminés récemment en France et en Europe, par la technique de l'enfermement de la végétation (cuvette, chambres) aujourd'hui bien maîtrisée. Les données que nous avons employées nous semblent assez représentatives de la couverture végétale centrale et sud-européenne.

• **Densité de biomasse foliaire (D).** La détermination de la densité de biomasse foliaire par essence, est au moins aussi complexe que la détermination de son taux d'émission normalisé. En effet, nombreux sont les facteurs susceptibles de modifier D pour une espèce donnée. Citons parmi ceux-ci : la période de l'année, l'âge des arbres, leur nombre à l'hectare, l'altitude, la fertilité du sol, l'exposition, l'acidité du sol, la situation géographique, la pollution [74], les stress divers [3, 22], sans compter les écarts induits par les protocoles et techniques expérimentales de détermination des densités elles-mêmes. En bref, la densité de biomasse d'une espèce dépend d'une bonne dizaine de paramètres. Dès lors, on conçoit la grande difficulté d'attribuer une valeur de D unique et fiable à l'ensemble des couverts végétaux d'une même espèce situés sur un grand territoire où les facteurs évoqués ci-dessus peuvent varier fortement d'un site à l'autre. La difficulté d'attribuer à chaque essence une densité de biomasse spécifique, a conduit certains chercheurs à classer les écosystèmes forestiers au sein de groupes différents (chênes, autres feuillus, picéas, autres conifères...) [3, 37, 75] et à affecter à toutes les espèces appartenant à un groupe la même densité de biomasse. Or, fréquemment, les densités de groupe, ainsi attribuées, sont très différentes des densités de chacune des espèces constituant le groupe. L'attribution d'une densité de biomasse foliaire à chaque essence, doit permettre de réduire les incertitudes inhérentes à l'affectation d'une valeur moyenne commune à un groupe donné de végétaux. Une source riche de données très diverses sur les forêts mondiales est constituée par la très importante compilation réalisée par Cannell [74]. Cependant, cette compilation et les données disponibles pour la végétation européenne

se sont avérées insuffisantes pour permettre d'attribuer une densité de biomasse foliaire à chacune des 32 essences principales composant la forêt française. Le tableau 4, rassemble les densités de biomasse recensées dans la littérature pour 22 des 32 espèces, support de notre estimation. Sur l'ensemble, 9 espèces sont pourvues de densités déterminées en France. Les valeurs répertoriées dans le tableau 4 nous ont permis de sélectionner ou de calculer les densités de biomasse foliaire retenues pour notre estimation (Tableau 5a, p. 399). Dans certains cas, une densité de biomasse moyenne a pu être calculée en réalisant, lorsque cela était possible, la moyenne arithmétique des différentes valeurs de la densité de biomasse foliaire attribuées à chaque espèce. Seules les valeurs représentées en gras dans le tableau 4 ont été retenues pour ce calcul. Si l'on considère les valeurs des densités, le tableau 5a permet de distinguer deux groupes d'espèces : les conifères, avec deux sous-groupes (*Pinus* et *Picea*) et les feuillus. Sur les 10 espèces n'ayant pas fait l'objet de détermination de densité de biomasse foliaire et nécessaires à notre estimation (Tableau 5b, p. 399), 4 sont des feuillus émetteurs qui représentent 2,6 % de la forêt française, 4 sont de faibles émetteurs (2 feuillus et 2 pinus) et 2 sont non émetteurs. Faute de mieux, chacune de ces espèces a été dotée de la densité de biomasse moyenne du groupe auquel elle appartient.

• **Facteur environnemental correctif (C : T et PAR).** Le PAR et la température ont été fournis par Météo-France à partir des mesures effectuées par un réseau de stations de terrain présentes dans les 93 départements métropolitains français. Les températures et PAR mensuels moyens retenus pour les cinq ans de l'estimation (mars 1994-octobre 1998) sont calculés à partir des valeurs horaires de ces paramètres mesurés de 6 h à 17 h TU de mai à septembre et de 8 h à 16 h TU pour mars, avril et octobre. Les températures nocturnes sont mesurées de 19 h à 5 h TU. Seules les émissions biogéniques se produisant de mars à octobre sur les cinq années ont été calculées car de novembre à février, en France, les émissions de COV biogéniques sont très faibles ou nulles.

La précision de l'estimation de l'émission des COV peut être améliorée si l'on considère les variations des variables microclimatiques (T, PAR) au sein de la canopée. Guenther et al. [21] montrent que l'émission foliaire est mieux décrite en intégrant les variations de la température et du PAR mesurées dans l'ensemble de la canopée. Différents modèles ont été proposés pour caractériser la variation verticale du microclimat au sein de la canopée [76-78]. Dans ces modèles, les taux d'émission biogéniques normalisés employés, estimés au niveau de la feuille, sont supérieurs à ceux de la branche porteuse dans son ensemble [37]. La décroissance de l'intensité lumineuse au sein de la canopée induit une diminution de l'émission biogénique et de la température foliaire qui est aussi affectée par la vitesse du vent et par l'humidité

Tableau 4.
Recensement des densités de biomasse foliaire (t ha⁻¹) déterminées dans le monde pour 22 espèces retenues dans notre estimation.
Foliar densities (t ha⁻¹) determined in the world for 22 trees used in this study.

Essence	France	Belgique	Allemagne	Suisse	Italie	Espagne	Pays-Bas	Angleterre	Irlande	Tchécoslovaquie	Hongrie
<i>Abies alba</i>		2,8 (13-18)		12,6 (56)	17,8 (95)					6,8 (51)	
<i>Alnus glutinosa</i>	2,8 (25)	3,2 (14)						0,7 à 2,5 (24-55)			
<i>Betula pendula</i>	3,5 (35)							0,4-0,7-1,9-3,6 (1-2-5-9)			
<i>Carpinus betulus</i>											
<i>Castanea sativa</i>											
<i>Eucalyptus globulus</i>											
<i>Fagus sylvatica</i>	3-3,2-3,5 (150-270)	3 (144)	3,3-3,2-3,1 (59-80-122)	3-3,2 (80-98)	2-4 (60)		3,3 (140)				
<i>Fraxinus excelsior</i>											
<i>Picea abies</i>		16,1 (55)	18,9-17,9-15,9 (34-87-76)	19,8-16,2-14,9-14,4 (40)				26,6 (17)	14,6 (33)		
<i>Picea sitchensis</i>											
<i>Pinus laricio</i>	5,6 (15)										
<i>Pinus nigra</i>											
<i>Pinus pinaster</i>	9*						9,4 (22)				
<i>Pinus pinea</i>	12,7 (jusqu'à 35)										
<i>Pinus sylvestris</i>				4,8-5,4-5,1-5,2 (32-70)							
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	14 (24)	7,7 (70)				11,5 (80)		5,1 à 10,5 (17-55)			3,4 (65-68)
<i>Quercus cerris</i>											
<i>Quercus ilex</i>	7 (150)										
<i>Quercus petraea</i>		3,5 (117)					3,3 (140)				3,4 (65-68)
<i>Quercus pubescens</i>											
<i>Quercus robur</i>	2,2 (40)	3,6-4 (66-120)		5,3 (13)							
<i>Tilia cordata</i>											

() : âge des essences inventoriées.
* : Simon et al. [56].

Tableau 4 (suite).
Recensement des densités de biomasse foliaire ($t\ ha^{-1}$) déterminées dans le monde pour 22 espèces retenues dans notre estimation.
Foliar densities ($t\ ha^{-1}$) determined in the world for 22 trees used in this study.

Essence	Pologne	Australie	Japon	Russie	Bulgarie	Suède	Finlande	États-Unis	Roumanie	Danemark	Canada
<i>Abies alba</i>									26,7 (110)		
<i>Alnus glutinosa</i>				1,3-2,3 (20)-3,6 (42)			2,9 (40)				
<i>Betula pendula</i>											
<i>Carpinus betulus</i>											
<i>Castanea sativa</i>											
<i>Eucalyptus globulus</i>		1,1 (4)-4 (10)			3,8-2,9-4,7 (100)	3,6 (90)			3 (21-40)	2,1 à 2,9 (45-200)	
<i>Fagus sylvatica</i>										2,7 (12-14)	
<i>Fraxinus excelsior</i>											
<i>Picea abies</i>			16,9-23,9-24,6 (45-39-30)	12,5 (110)		18 (55)	6,6 (260)	15,5-18,4-15,8 (42)			
<i>Picea sitchensis</i>											
<i>Pinus laricio</i>											
<i>Pinus nigra</i>											
<i>Pinus pinaster</i>		19,8 (14)									
<i>Pinus pinea</i>											
<i>Pinus sylvestris</i>	7,3-5,7-7,7-7,8 (17)	16,7 (50)		13,9-15,1 (71-100)		7,8 (84)		7,8-9,1 (36)			9,6 (15-20)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>											
<i>Quercus cerris</i>											
<i>Quercus ilex</i>											
<i>Quercus petraea</i>											
<i>Quercus pubescens</i>				4,1 (40)					2,4 (37)		
<i>Quercus robur</i>				2,8-4,5 (40-74)							
<i>Tilia cordata</i>											

() : âge des essences inventoriées.

Tableau 5a.

Densités foliaires ($t\ ha^{-1}$) pour 22 essences faisant partie de l'estimation et coefficients de variation pour certaines densités foliaires.

Foliar densities ($t\ ha^{-1}$) and relevant variation coefficients (calculated whenever possible from statistical data) for the 22 forest species.

Essences	Densité foliaire	Coefficients de variation
Feuillus		
<i>Q. cerris</i>	3,4 (1)	33
<i>Q. ilex</i>	7 (1) F	
<i>Q. petraea</i>	3,4 (3)	
<i>Q. pubescens</i>	2,4 (1)	
<i>Q. robur</i>	3,3 (4) F	
<i>A. glutinosa</i>	2,8 (1)	
<i>B. pendula</i>	2,8 (1) F	14
<i>C. betulus</i>	3,5 (2) F	
<i>C. sativa</i>	3,6 (1)	
<i>E. globulus</i>	4 (1)	
<i>F. sylvatica</i>	3,2 (12) F	
<i>F. excelsior</i>	2,7 (1)	
<i>T. cordata</i>	3,6 (2)	
Picea		
<i>P. abies</i>	16,8 (8)	11
<i>A. alba</i>	15,2 (2)	
<i>P. menziesii</i>	14 (1) F	
<i>P. sitchensis</i>	14,6 (1)	
Pinus		
<i>P. nigra (laricio)</i>	5,6 (1) F	33
<i>P. nigra (nigricans)</i>	9,4 (1)	
<i>P. pinaster</i>	9 (1) F	
<i>P. pinea</i>	12,7 (1) F	
<i>P. sylvestris</i>	8 (14)	

Le nombre de valeurs de densités foliaires ayant servi au calcul de la densité foliaire est indiqué entre parenthèses. Dans quelques cas, lorsque les données étaient suffisantes, les densités moyennes et leurs coefficients de variation ont pu être calculés.

F : déterminé en France.

Remarque. Les critères de choix des densités retenues dans ce tableau sont explicités par Luchetta [38].

relative à l'intérieur de la canopée. C'est ainsi que lors de périodes d'ensoleillement, les températures foliaires au sommet de la canopée sont supérieures de plusieurs degrés à la température ambiante, elle-même supérieure à la température des feuilles situées à l'intérieur de la canopée [15]. Au final, l'effet sur l'émission du végétal des taux d'émission foliaires plus élevés utilisés dans les modèles de canopée, est en partie compensé par des PAR et des températures foliaires plus faibles au sein de la canopée. C'est ainsi que Simpson et al. [6] déterminent que les émissions calculées avec un modèle de canopée sont environ 20 % supérieures à celles obtenues sans modèle. Estimant cet écart faible par rapport aux incertitudes liées à tout inventaire, Simpson et al. [13] excluent l'utilisation d'un modèle

Tableau 5b.

Densités foliaires moyennes ($t\ ha^{-1}$) calculées à partir des valeurs listées dans le tableau 5a.

Average foliar densities assigned from values listed in table 5a.

Essences	Densité foliaire moyenne
<i>A. campestre</i>	3,3
<i>L. decidua</i>	3,3
<i>P. halepensis</i>	9
<i>P. uncinata</i>	9
<i>P. globulus</i>	3,3
<i>P. avium</i>	3,3
<i>Q. suber</i>	3,3
<i>R. pseudoacacia</i>	3,3
<i>S. alba</i>	3,3
<i>U. campestre</i>	3,3

de canopée dans leur récent inventaire d'émission européen. Compte tenu du manque de données sur les taux d'émission applicables au niveau de la feuille, des multiples incertitudes d'application qui pèsent sur les divers modèles de canopée proposés [78], de l'absence de validation de ces modèles et en raison aussi de leur relatif faible impact quantitatif sur les émissions, il nous a semblé prématuré d'introduire de tels systèmes dans notre estimation.

Incertainitudes sur les facteurs d'émission

L'incertitude sur les résultats finaux consécutifs à l'utilisation des algorithmes de calcul des émissions biogéniques, est fonction de l'ensemble des incertitudes avec lesquelles on détermine chacun des facteurs intervenant dans le calcul. L'incertitude sur les émissions massiques globales a été calculée à partir des incertitudes estimées sur les différents facteurs figurant dans les expressions (1) et (2). L'un des moyens de déterminer la précision sur l'estimation de l'émission massique (EM) des COV biogéniques consiste à déterminer l'écart-type sur EM à l'aide des écarts-types relatifs, calculés pour chacun des facteurs du calcul. Ce type d'approche de l'incertitude a été possible dans le cas des taux d'émission normalisés (I) et des densités de biomasse foliaire (D) pour lesquels nous disposons, pour certaines espèces, de suffisamment de données pour effectuer des déterminations statistiques. En revanche, cela n'a pas été possible dans le cas des autres facteurs figurant dans les expressions algorithmiques (1) et (2). Pour les variables micrométéorologiques (PAR, T), des valeurs moyennes ont été utilisées pour les calculs de l'émission massique. L'incertitude que nous avons retenue sur ces facteurs est égale à l'écart maximal observé, ou estimé, par rapport à la valeur de la moyenne. Il en a été de même pour le facteur représentatif de la surface de la couverture forestière (S).

• **Taux d'émission normalisés (I).** Nous avons calculé (Tableau 3, p. 395) les coefficients de variation

relatifs aux taux d'émission normalisés de certaines espèces utilisées dans cette estimation. Les rares coefficients de variation obtenus donnent une idée quantitative de l'incertitude avec laquelle sont déterminés les taux d'émission normalisés. Si l'on considère ces coefficients de variation, on constate qu'ils sont au maximum voisins de 100 %. Ceci signifie statistiquement que la valeur de l'écart-type calculé sur ces taux d'émission est proche de la valeur de leur moyenne arithmétique. Dans nos calculs, nous avons adopté un domaine d'incertitude sur les taux d'émission correspondant à un coefficient de variation de 200 %, c'est-à-dire un domaine d'incertitude dont l'étendue est caractérisée par un écart maximal par rapport à la moyenne de plus ou moins deux fois l'écart-type. Pour les ACOV, un écart de plus ou moins 500 % par rapport au taux d'émission moyen a été adopté. Cette énorme incertitude est liée au très petit nombre de données fiables disponibles sur les différentes familles de composés constituant les ACOV.

• **Densité de biomasse foliaire (D).** Malgré le nombre important de facteurs influençant la densité de biomasse foliaire, la dispersion des valeurs répertoriées dans la littérature pour les essences étudiées est relativement faible (Tableau 4, p. 397-398). Les coefficients de variation sur les densités de biomasse foliaire moyennes que nous avons pu calculer sont portés dans le tableau 5a. Au vu de ces résultats, nous avons adopté pour nos calculs un domaine d'incertitude correspondant à un coefficient de variation de 70 %, soit sensiblement le double de la valeur maximale (33 %) calculée. Lors d'une étude similaire à celle-ci, Veldt [79] a attribué un facteur d'incertitude de 50 % à la densité de biomasse foliaire.

• **Facteur environnemental correctif (C : T et PAR).** Le coefficient β caractérise le lien mathématique qui existe entre l'émission monoterpénique d'une espèce donnée et sa température foliaire ; il est de ce fait spécifique de cette espèce et du COV émis. Il est cependant, matériellement impossible de déterminer un coefficient β pour chaque espèce étudiée, ainsi que ses variantes associées à chacun des COV émis par cette espèce. L'étude faite par Guenther et al. [21] montre la variabilité de β lorsqu'il est déterminé pour une espèce donnée par différents auteurs. La variabilité est importante aussi pour les différents COV émis par la même espèce. Les différences rapportées dans l'estimation de β peuvent être dues

- aux variations des émissions, feuille à feuille, ou saisonnières ;
- aux différentes tensions de vapeur et solubilités des différents monoterpènes ;
- aux différents modes de stockage et d'émission par les différentes plantes, notamment entre conifères et feuillus ;
- aux températures de la plante avant la mesure ;
- aux erreurs expérimentales.

Dans la simulation effectuée, Guenther et al. calculent les différences entre les taux d'émission résultant de

l'application d'un $\beta = 0,09 \text{ K}^{-1}$ et des valeurs alternatives de β comprises entre 0,057 et $0,144 \text{ K}^{-1}$. Ces dernières, sont les valeurs extrêmes de β figurant dans la compilation bibliographique faite par Guenther et al. Pour un calcul portant sur les taux d'émission horaires, l'écart est inférieur à 25 % et inférieur à 10 % pour une estimation portant sur 24 heures. Sur la base des données existante et suivant les recommandations de Guenther et al. [21], nous avons utilisé une valeur de $\beta = 0,09 \text{ K}^{-1}$. En ce qui concerne la température, l'erreur commise systématiquement est surtout due au fait que les températures ambiantes retenues pour le calcul des émissions, sont mesurées sous abri et sont, en général, comprises entre les températures des feuilles émettrices placées au soleil et les températures des feuilles émettrices placées à l'ombre au sein de la canopée. Cet écart thermique, qui est en général de quelques degrés, ainsi que les erreurs systématiques liées aux instruments de mesure, ont un impact certain sur le facteur température figurant dans les algorithmes. Pour tenir compte de cet impact, nous avons retenu pour le calcul de l'incertitude, un domaine dont l'écart maximal par rapport à la température foliaire moyenne est de plus ou moins 3°C .

La mesure de l'intensité lumineuse est généralement effectuée à la partie supérieure externe de la canopée. Bien que cette intensité diminue de l'extérieur vers l'intérieur de la canopée, on peut admettre que cette atténuation a peu d'impact sur l'émission des monoterpènes qui dépend, en général, uniquement de la température. En ce qui concerne l'isoprène, au-delà d'un PAR de $700\text{-}900 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ selon les espèces, l'émission sature [21, 80]. Les erreurs commises sur la mesure du PAR, généralement supérieur à ce seuil, ont de ce fait, nous semble-t-il, un faible impact sur le facteur d'émission algorithmique dépendant du PAR. L'incertitude maximale a été arbitrairement fixée à plus ou moins 25 % de la valeur du PAR moyen servant au calcul.

• **Couverture végétale (S).** Certains facteurs générateurs d'erreurs dans l'évaluation des surfaces occupées par les essences peuvent être liés au processus de déforestation et de repeuplement intervenus entre les différents cadastres. Ces modifications sont régulièrement inventoriées par l'IFN qui effectue tous les ans des mises à jour du couvert forestier dans huit à dix départements français. La résolution spatiale de cette détermination cadastrale est de $0,002 \text{ km}^2$. L'incertitude adoptée, liée aux différentes erreurs d'évaluation des surfaces a été fixée à plus ou moins 20 % de la surface moyenne retenue.

Résultats

Émissions à l'échelle départementale

Sur les cinq années étudiées (1994-1998), les moyennes annuelles des émissions forestières de monoterpènes, d'isoprène et des autres composés organiques volatils biogéniques à l'échelle des départements métropolitains français, sont réunies

dans le tableau 6, p. 404-405, et représentées dans les figures 1 à 3. Si pour la commodité de la présentation, nous considérons qu'une émission annuelle inférieure à 1,5 kt an⁻¹ est faible, qu'entre 1,5 et 5 kt an⁻¹ elle est moyenne, qu'entre 5 et 9 kt an⁻¹ elle est forte, et très forte lorsqu'elle se situe entre 9 et 19 kt an⁻¹, 27 départements métropolitains sont concernés par une forte ou très forte émission monoterpénique et 42 par des émissions faibles. Sauf exception, les

émissions monoterpéniques élevées se situent entre le nord-est et le sud-ouest en passant par l'est et le sud de la France. Remarquons que tous les massifs montagneux figurent dans cette catégorie. Les départements de l'ouest et du nord sont en revanche faiblement émetteurs.

En ce qui concerne l'isoprène, plus du tiers des départements français (35) sont des forts ou très forts émetteurs alors que dans 16, l'émission est

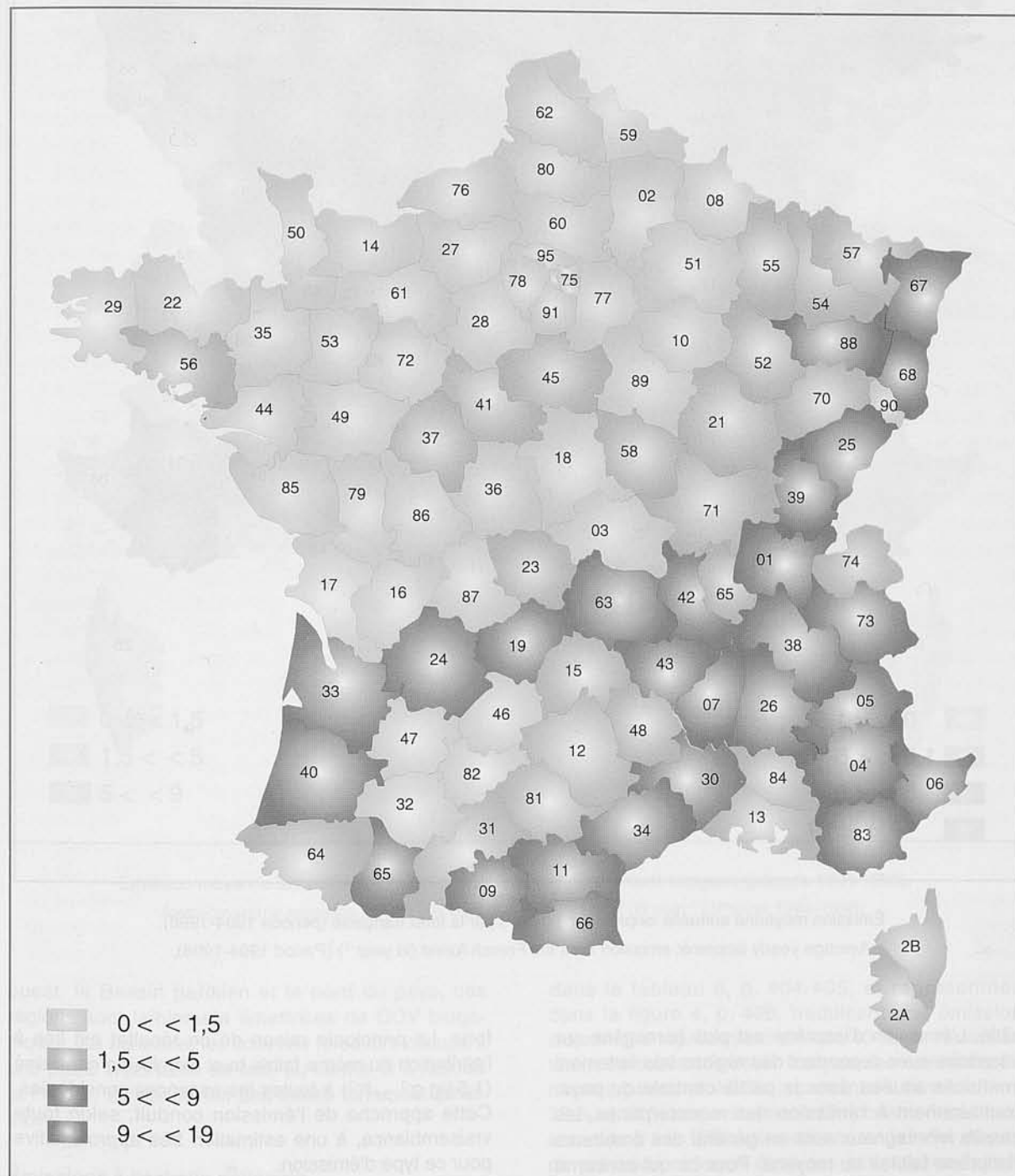


Figure 1.

Émission moyenne annuelle monoterpénique (kt an⁻¹) par la forêt française (période 1994-1998).

Average yearly monoterpene emission from the French forest (kt year⁻¹) (Period 1994-1998).

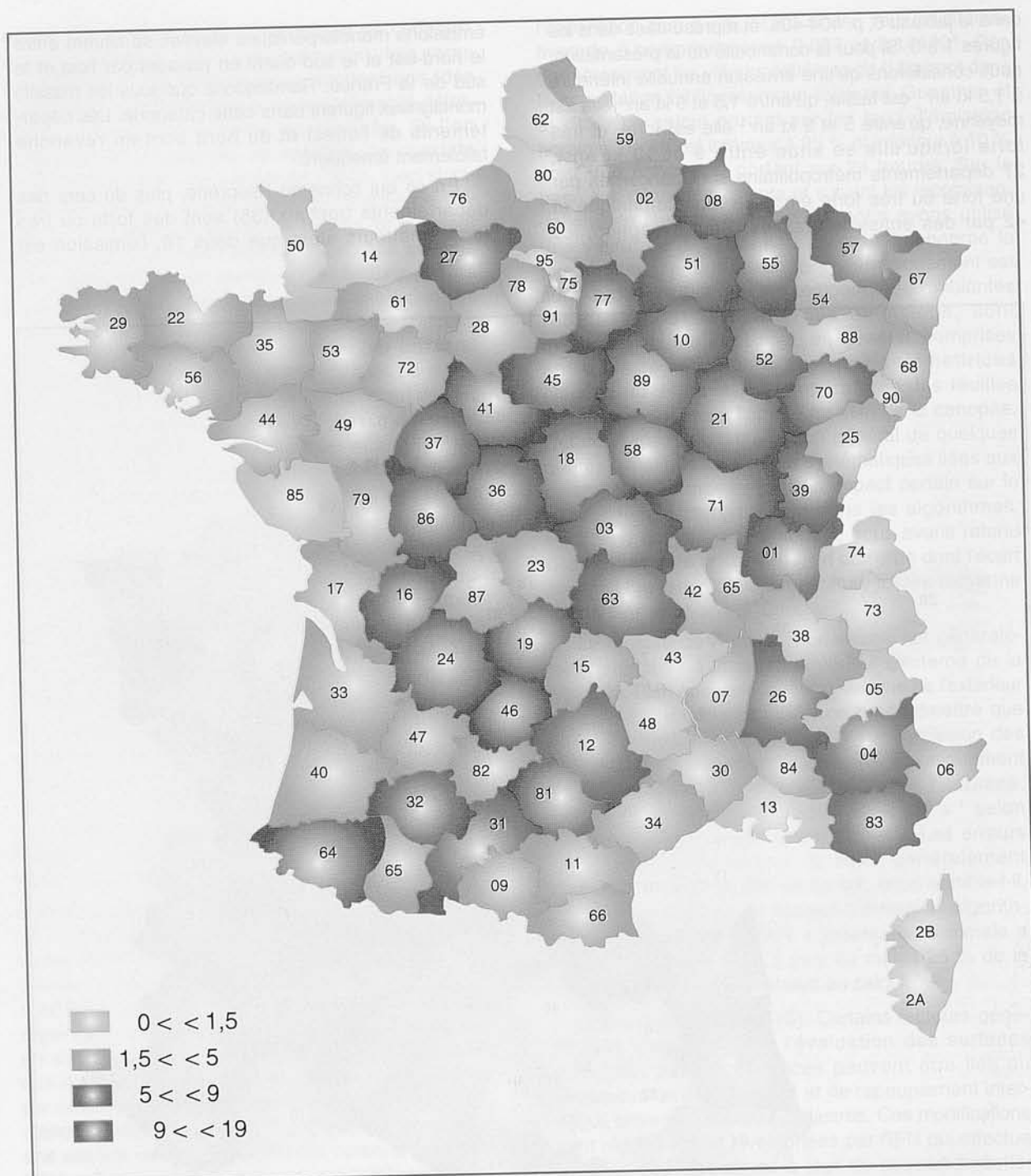


Figure 2.
Émission moyenne annuelle isoprénique (kt an⁻¹) par la forêt française (période 1994-1998).
Average yearly isoprenic emission from the French forest (kt year⁻¹) (Period 1994-1998).

faible. L'émission d'isoprène est plus homogène sur le territoire avec cependant des régions très fortement émettrices situées dans la partie centrale du pays. Contrairement à l'émission des monoterpènes, les massifs montagneux sont en général des émetteurs d'isoprène faibles ou moyens. Pour ce qui concerne l'émission des ACOV, la plupart des départements français sont faiblement ou moyennement émetteurs, 2 seulement (Landes et Var) sont des émetteurs

forts. La principale raison de ce résultat est liée à l'attribution du même faible taux d'émission normalisé ($1,5 \mu\text{g g}^{-1} \rho_s \text{ h}^{-1}$) à toutes les essences considérées. Cette approche de l'émission conduit, selon toute vraisemblance, à une estimation très approximative pour ce type d'émission.

L'estimation des émissions à l'échelle départementale est conforme à la répartition des espaces boisés. Peu développés dans l'ouest, le centre-

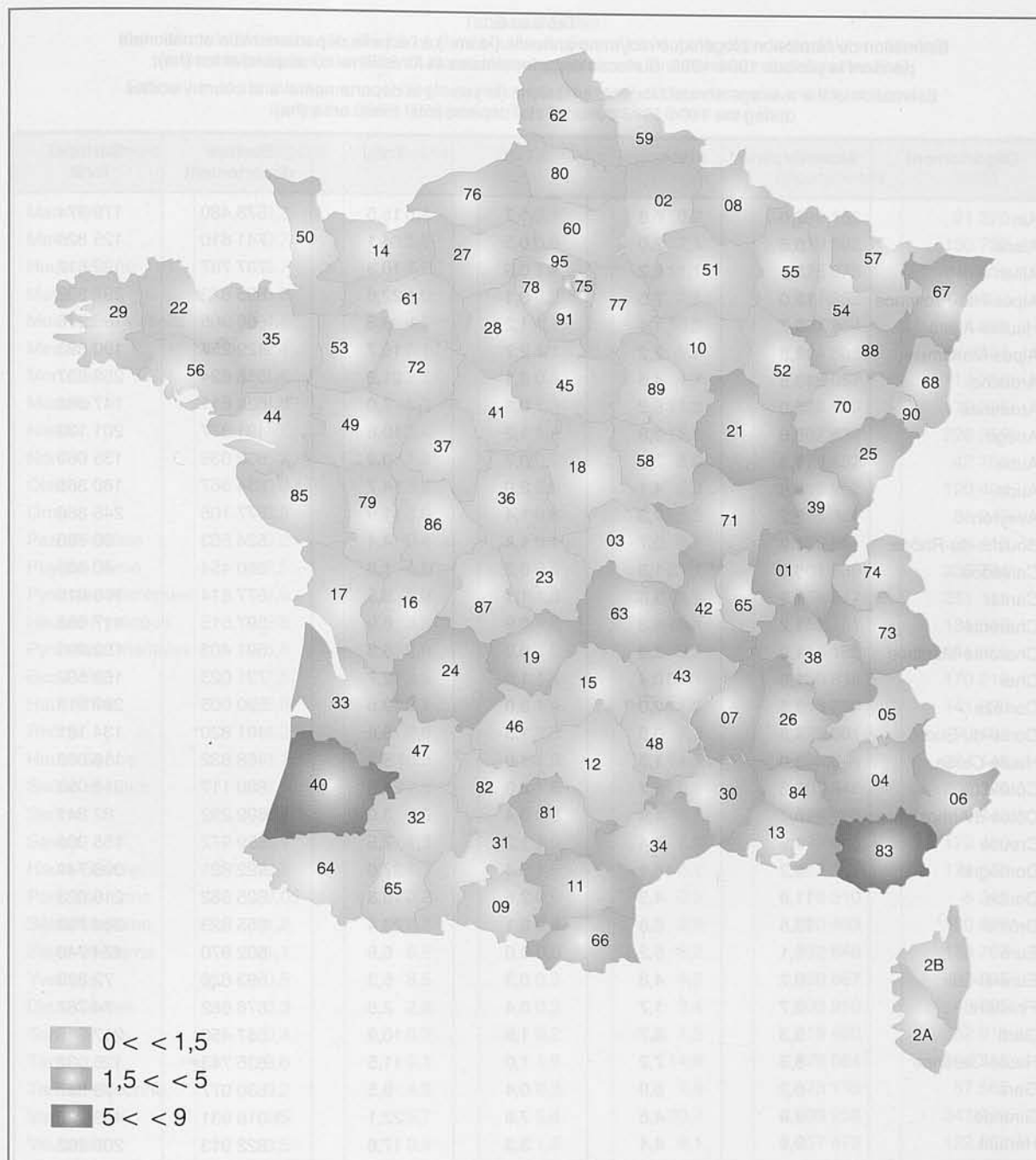


Figure 3.
Émission moyenne annuelle des « autres COV » (kt an⁻¹) par la forêt française (période 1994-1998).
Average yearly emission of OVOCs from the French forest (kt year⁻¹) (Period 1994-1998).

ouest, le Bassin parisien et le nord du pays, ces régions sont faiblement émettrices de COV biogéniques. Au contraire, les couverts forestiers occupent une place importante au sud, au centre et à l'est de la France, ce qui en fait des zones fortement émettrices.

Émissions à l'échelle nationale

Les valeurs des émissions annuelles à l'échelle nationale, pour les trois types de COV, regroupées

dans le tableau 6, p. 404-405, et représentées dans la figure 4, p. 406, traduisent une émission isoprénique représentant environ 49 % de l'émission totale du couvert forestier français, les émissions de monoterpènes et ACOV représentant sensiblement 37 % et 14 % respectivement. L'importante incertitude associée à ces différentes valeurs est le reflet du peu de précision obtenue dans les estimations faites. C'est ainsi que si l'on considère les valeurs extrêmes du domaine d'incertitude et les résultats de l'émission sur lesquels portent ces incertitudes, le rapport est

Tableau 6.

Estimation de l'émission biogénique moyenne annuelle (kt an⁻¹) à l'échelle départementale et nationale pendant la période 1994-1998. Surfaces départementales et forestières correspondantes (ha).

Estimation of the average annual biogenic emissions (kt year⁻¹) at departemental and country scales during the 1994-1998 period. Total departmental forest area (ha).

Département	Monoterpène	Isoprène	AVOC	Total	Surface département	Surface forêt
Ain	7,0	6,8	1,7	15,5	578 480	179 374
Aisne	0,6	3,0	0,5	4,1	741 810	125 826
Allier	1,2	8,2	0,9	10,3	737 787	122 612
Alpes-Hte-Provence	12,0	7,5	3,1	22,6	695 842	297 852
Hautes-Alpes	5,7	1,4	1,2	8,3	568 965	193 576
Alpes-Maritimes	11,8	2,2	2,7	16,7	429 258	190 893
Ardèche	13,5	4,6	3,1	21,2	556 634	252 637
Ardenne	1,0	5,2	0,8	7,0	524 611	147 363
Ariège	5,6	3,8	1,2	10,6	491 377	201 139
Aube	1,3	7,9	0,7	9,9	603 036	135 069
Aude	8,6	4,1	2,0	14,7	634 367	180 369
Aveyron	3,2	7,3	1,4	11,9	877 105	245 860
Bouche-du-Rhône	1,9	0,7	1,8	4,4	524 583	96 788
Calvados	0,3	1,3	0,2	1,8	560 454	40 365
Cantal	3,9	3,5	1,1	8,5	577 814	160 016
Charente	1,2	6,8	0,9	8,9	597 515	117 688
Charente-Maritime	1,0	3,9	0,9	5,8	691 403	102 995
Cher	1,3	10,4	1,0	12,7	731 023	162 592
Corrèze	6,5	10,0	3,0	19,5	590 005	267 018
Corse-du-Sud	4,8	0,5	1,3	6,6	401 820	134 181
Haute-Corse	3,0	1,3	1,0	5,3	468 832	118 096
Côte-d'Or	3,3	18,7	2,0	24,0	880 117	318 092
Côtes-d'Armor	0,7	1,9	0,4	3,0	699 292	82 841
Creuse	1,9	4,4	1,2	7,5	559 972	155 006
Dordogne	5,2	18,4	3,4	27,0	922 821	396 749
Doubs	11,9	4,3	2,6	18,8	525 582	218 023
Drôme	13,5	6,8	3,1	23,4	655 823	284 793
Eure	1,1	5,2	0,6	6,9	602 970	124 748
Eure-et-Loir	0,2	4,8	0,3	5,3	593 626	72 323
Finistère	0,7	1,7	0,4	2,8	676 862	74 767
Gard	5,3	3,7	1,9	10,9	587 450	217 246
Haute-Garonne	3,3	7,2	1,0	11,5	635 743	125 032
Gers	0,2	5,9	0,4	6,5	630 077	76 597
Gironde	9,9	4,6	7,6	22,1	1 015 931	483 222
Hérault	9,9	4,4	3,3	17,6	622 913	203 202
Ille-et-Vilaine	0,8	2,3	0,4	3,5	684 189	56 510
Indre	0,5	8,6	0,6	9,7	689 802	118 004
Indre-et-Loire	1,5	6,9	1,0	9,4	615 403	135 126
Isère	11,8	4,7	2,7	19,2	788 300	254 201
Jura	10,0	6,6	2,3	18,9	504 857	223 095
Landes	11,5	3,9	8,8	24,2	934 684	563 226
Loir-et-Cher	2,6	9,3	1,2	13,1	642 357	186 461
Loire	8,3	3,1	1,7	13,1	480 539	126 719
Haute-Loire	7,6	1,3	1,4	10,3	500 447	182 322
Loire-Atlantique	0,4	2,1	0,3	2,8	695 640	44 044
Loiret	2,0	8,6	0,9	11,5	681 452	168 122
Lot	0,9	10,1	1,0	12,0	522 451	201 850
Lot-et-Garonne	1,4	4,6	1,3	7,3	534 728	118 987
Lozère	3,6	1,1	0,9	5,6	517 491	232 346
Maine-et-Loire	0,8	2,7	0,5	4,0	723 063	84 139

Tableau 6 (suite).

Estimation de l'émission biogénique moyenne annuelle (kt an⁻¹) à l'échelle départementale et nationale pendant la période 1994-1998. Surfaces départementales et forestières correspondantes (ha).

Estimation of the average annual biogenic emissions (kt year⁻¹) at departmental and country scales during the 1994-1998 period. Total departmental forest area (ha).

Département	Monoterpène	Isoprène	AVOC	Total	Surface département	Surface forêt
Manche	0,2	0,4	0,1	0,7	599 156	21 370
Marne	0,7	5,8	0,6	7,1	819 592	130 732
Haute-Marne	2,7	7,2	1,2	11,1	625 875	245 401
Mayenne	0,3	1,6	0,2	2,1	521 352	33 822
Meurthe-et-Moselle	4,4	4,5	1,1	10,0	527 964	162 999
Meuse	2,4	6,1	1,1	9,6	624 805	224 394
Morbihan	1,6	2,3	0,8	4,7	688 057	112 730
Moselle	4,8	5,2	1,3	11,3	625 189	172 396
Nièvre	1,7	13,4	1,4	16,5	687 433	226 259
Nord	0,2	1,6	0,2	2,0	574 432	42 750
Oise	0,9	3,8	0,5	5,2	588 932	120 494
Orne	1,3	3,6	0,6	5,5	614 361	88 949
Pas-de-Calais	0,2	0,4	0,1	0,7	670 651	39 412
Puy-de-Dôme	12,5	5,8	3,1	21,4	801 836	236 764
Pyrénées-Atlantiques	4,6	8,0	1,3	13,9	768 517	211 111
Hautes-Pyrénées	5,8	3,6	1,0	10,4	452 151	131 513
Pyrénées-Orientales	5,8	2,0	1,9	9,7	414 182	141 359
Bas-Rhin	7,8	3,5	1,8	13,1	480 338	170 212
Haut-Rhin	6,8	3,1	1,4	11,3	353 259	141 338
Rhône	4,3	2,6	1,0	7,9	325 881	70 108
Haute-Saône	3,1	10,2	1,3	14,6	539 044	224 140
Saône-et-Loire	2,1	12,8	1,6	16,5	861 348	200 760
Sarthe	1,4	4,5	0,8	6,7	624 483	104 448
Savoie	5,1	1,3	1,6	8,0	627 048	179 480
Haute-Savoie	2,8	1,3	1,0	5,1	483 862	171 373
Paris couronne	0,05	0,2	0,0	0,3	76 310	8 242
Seine-Maritime	1,2	2,2	0,4	3,8	630 403	100 877
Seine-et-Marne	1,1	6,5	0,6	8,2	592 648	133 767
Yvelines	0,5	3,5	0,3	4,3	230 667	69 625
Deux-Sèvres	0,3	2,8	0,3	3,4	603 910	48 825
Somme	0,4	0,7	0,2	1,3	619 480	52 911
Tarn	3,8	9,1	1,9	14,8	578 084	164 313
Tarn-et-Garonne	0,2	4,3	0,3	4,8	373 115	57 565
Var	9,5	5,7	5,5	20,7	603 250	341 019
Vaucluse	3,5	3,9	1,7	9,1	357 472	122 663
Vendée	0,3	1,2	0,2	1,7	677 211	34 918
Vienne	0,8	6,5	0,7	8,0	703 759	112 723
Haute-Vienne	1,4	4,7	1,0	7,1	555 701	141 202
Vosges	14,7	4,5	3,0	22,2	589 953	281 320
Yonne	1,4	14,9	1,3	17,6	746 192	221 563
Territoire-de-Belfort	0,6	0,6	0,2	1,4	61 059	25 415
Essonne	0,3	1,9	0,2	2,4	181 914	41 889
Val-d'Oise	0,1	0,8	0,1	1,0	125 253	24 423
France	350 ± 1 085	457 ± 1 691	129 ± 787	936 ± 3 563	549 000 km ²	140 000 km ²

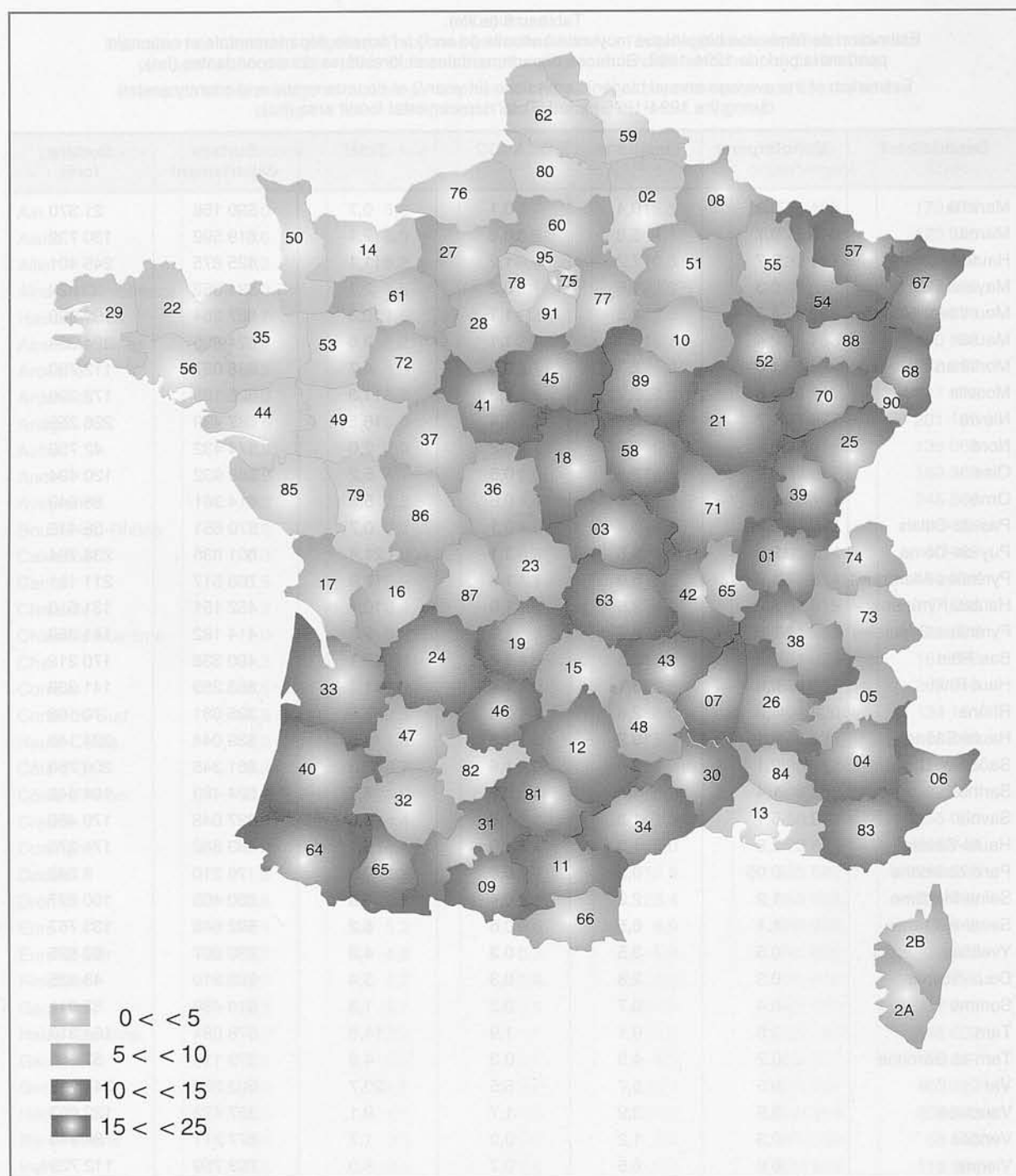


Figure 4.

Émission moyenne annuelle des COV biogéniques (kt an⁻¹) par la forêt française (période 1994-1998).Average yearly emission of biogenic VOCs from the French forest (kt year⁻¹) (Period 1994-1998).

voisin de 5 pour l'isoprène, de 4 pour les monoterpènes, de 7 pour les ACOV et de 5 pour la totalité des COV biogéniques.

La figure 5, ci-contre, représente l'évolution mensuelle sur une année, de l'émission massique des différents COV à l'échelle nationale. Le profil total terpénique émis mensuellement présente une montée progressive de mars à juillet corrélée à la montée de la température et de l'intensité lumineuse.

L'émission atteint son maximum pendant les deux mois chauds de l'été, avant de chuter rapidement en septembre et octobre. En juillet et août, l'émission représente environ 52 % du total avec respectivement 243 et 246 kt. Des profils semblables ont été obtenus par Pistikopoulos [11] et par Andréani-Aksoyoglu et Keller [12] lors d'inventaires d'émissions réalisés respectivement en Grèce et en Suisse. Notons que l'émission naturelle du couvert forestier pendant les

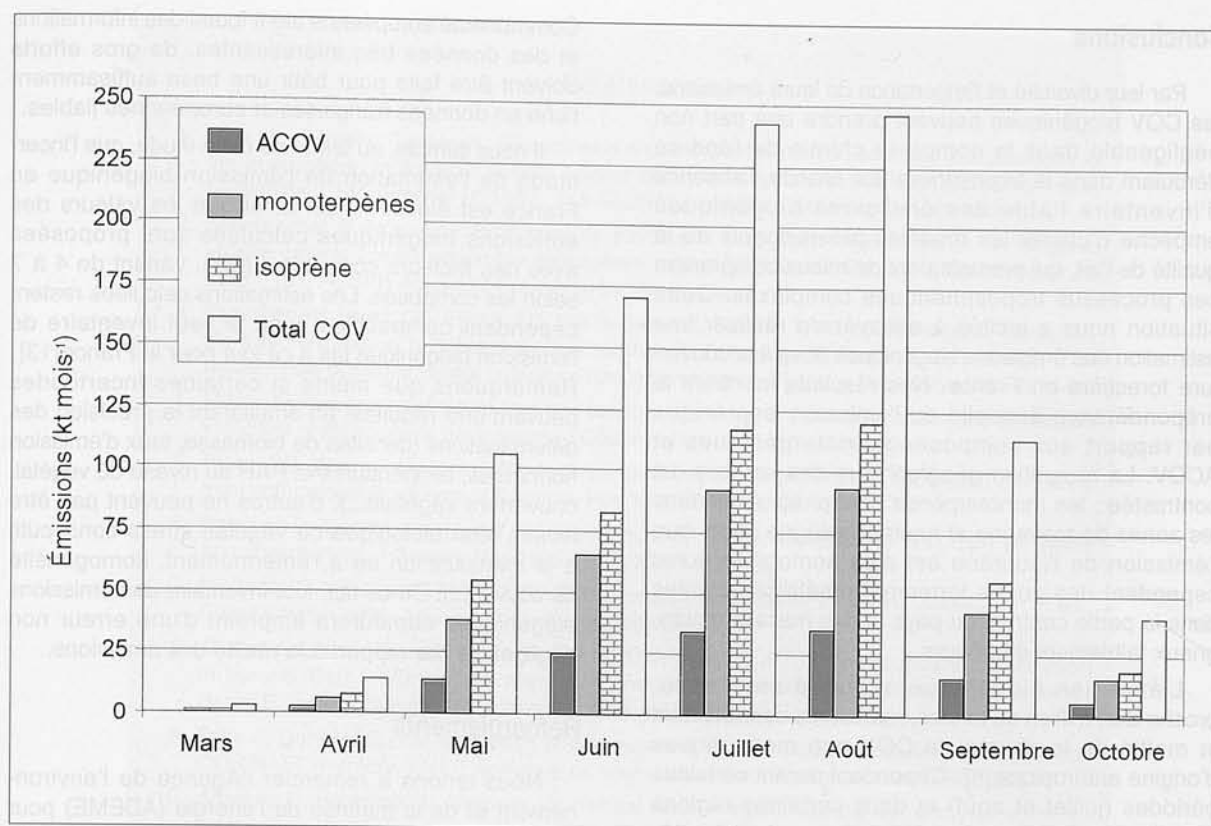


Figure 5.

Émission moyenne mensuelle des ACOV, monoterpènes, isoprène et de la totalité des COV par la forêt française. Moyenne calculée sur les cinq ans de l'étude (1994-1998).

Average monthly emission of OVOCs, monoterpenes, isoprene and total VOCs (kt month⁻¹) from the French forest. Average has been calculated over the five years of the study (1994-1998).

mois de juillet et août est supérieure à l'émission anthropique mensuelle moyenne en France, estimée à 192 kt mois⁻¹ par Olendrzynski [8].

Nous avons réuni dans le tableau 7 les seules estimations des émissions biogéniques concernant la France résultant de nos travaux et celles tirées des deux récents inventaires sur les émissions en Europe réalisés par Simpson et al. [6, 13]. Dans l'inventaire de 1995, Simpson et al. s'intéressent uniquement à l'isoprène et aux ACOV émis à partir de cinq groupes de

végétaux en leur appliquant des facteurs d'émission tirés, en partie, de bases de données américaines. Les forts écarts sur l'émission d'isoprène observés entre nos travaux et ceux de Simpson et al. (1999) [13] peuvent être, en partie, expliqués par une répartition géographique de la végétation différente et surtout par l'affectation de taux d'émission normalisés différents d'une étude à l'autre. C'est ainsi que Simpson et al. appliquent aux principaux chênes émetteurs français un taux d'émission normalisé (60 µg.g⁻¹ poids sec h⁻¹) tiré de la base de données BEIS, parfois très supérieur aux taux normalisés que nous appliquons dans notre étude. La forte différence observée sur l'émission monoterpénique tient, selon nous, en grande partie aux taux d'émission attribués par Simpson et al. à nombre d'essences dominantes du territoire français. C'est ainsi que *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* et *Fagus sylvatica* sont dotés de taux d'émission standard de 0,2, 1,5 et 0,65 µg g⁻¹ poids sec h⁻¹ respectivement, alors que les taux que nous utilisons sont très nettement supérieurs pour ces trois essences.

Quoi qu'il en soit, le bilan global des émissions annuelles biogéniques en France résultant de ces études n'est pas très éloigné d'un travail à l'autre et avoisine un million de tonnes par an pour la couverture arboricole forestière.

Tableau 7.
Estimations des émissions biogéniques annuelles (kt an⁻¹)
du couvert forestier français.

Yearly biogenic emission (kt year⁻¹) estimation
from the French forest.

	Nos travaux	Simpson et al. (1995)	Simpson et al. (1999)
Isoprène	457	479	829
Monoterpènes	350		111
ACOV	129	216	110
Total	936	695	1 050

Conclusions

Par leur diversité et l'importance de leurs émissions, les COV biogéniques peuvent prendre une part non négligeable dans la complexe chimie de fond se déroulant dans la troposphère. En France, l'absence d'inventaire fiable des émissions biogéniques empêche d'utiliser les modèles prévisionnels de la qualité de l'air, qui permettraient de mieux comprendre ces processus troposphériques complexes. Cette situation nous a incités à essayer de réaliser une estimation des émissions biogéniques dues à la couverture forestière en France. Nos résultats montrent la prépondérance annuelle de l'émission isoprénique par rapport aux composés monoterpéniques et ACOV. La répartition géographique des sources est contrastée : les monoterpènes sont plutôt émis dans les zones de moyenne et haute montagne, alors que l'émission de l'isoprène est plus homogène, avec cependant des zones fortement émettrices situées dans la partie centrale du pays et des massifs montagneux faiblement émetteurs.

L'émission biogénique annuelle en France, proche d'un million de tonnes, représente sensiblement la moitié de la source de COV non méthaniques d'origine anthropique [8]. Cependant durant certaines périodes (juillet et août) et dans certaines régions (méditerranéennes), les émissions naturelles de COV peuvent largement dépasser les émissions de COV anthropiques. La conjonction de ces deux sources de COV peut conduire à un renforcement des phénomènes de pollution chimique et/ou photochimique. Ces processus peuvent dans certaines conditions jouer, au plan local ou régional, un rôle important dans les épisodes de pollution. En France, par exemple, l'aire méditerranéenne semble être propice en été à des phénomènes atmosphériques de pollution oxydante.

Dans cette étude, nous avons fait un effort important pour n'utiliser, dans la mesure du possible, que des données spécifiquement françaises ou européennes. Cette démarche aurait été facilitée si nous avions pu disposer de données statistiques en plus grand nombre. Bien que des projets récents financés par la

Communauté européenne aient fourni des informations et des données très intéressantes, de gros efforts doivent être faits pour bâtir une base suffisamment riche en données françaises et européennes fiables.

Il nous semble, au terme de cette étude, que l'incertitude de l'estimation de l'émission biogénique en France est élevée. C'est ainsi que les valeurs des émissions biogéniques calculées sont proposées avec des facteurs correctifs élevés, variant de 4 à 7 selon les composés. Les estimations calculées restent cependant compatibles avec le seul inventaire de l'émission biogénique fait à ce jour pour la France [13]. Remarquons que même si certaines incertitudes peuvent être réduites, en améliorant la précision des déterminations (densités de biomasse, taux d'émission normalisés, températures et PAR au niveau du végétal, couverture végétale...), d'autres ne peuvent pas être levées (état biologique du végétal, stress consécutif à la manipulation ou à l'enfermement, homogénéité du couvert...). De ce fait, tout inventaire des émissions biogéniques demeurera empreint d'une erreur non négligeable par rapport à la réalité des émissions.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) pour l'important soutien qu'elle nous a apporté dans la réalisation de ce travail.

Mots clés

Émissions biogéniques. Isoprène. Monoterpènes. Composés organiques volatils. Forêt. Estimation.

Keyword

Biogenic emissions. Isoprene. Monoterpenes. Volatile Organic Compounds. Forest. Estimation.

Références

1. Riba ML, Torres L. Terpenes : Biosynthesis and transport in plants ; emission and presence in the troposphere. In Biogenic volatile organic compounds in the atmosphere (edited by Helas G, Slanina J, Steinbrecher R) 1997 : 115-43. SPB Academic Publishing bv, Amsterdam.
2. Steinbrecher R. Isoprene : Production by plants and ecosystem-level estimates. In Biogenic volatile organic compounds in the atmosphere (edited by Helas G, Slanina J, Steinbrecher R) 1997 : 101-14. SPB Academic Publishing bv, Amsterdam.
3. Guenther AB, Hewitt CN, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, Mc Kay WA, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J, Zimmerman P. A global model of natural volatile organic compound emissions. J Geophys Res 1995 ; 100 : 8873-92.
4. Müller JF. Geographical distribution and seasonal variation of surface emission and deposition velocities of atmospheric trace gases. J Geophys Res 1992 ; 97 : 3787-804.
5. Piccot SD, Watson JJ, Jones JW. A global inventory of volatile organic compound emissions from anthropogenic sources. J Geophys Res 1992 ; 97 : 9897-912.
6. Simpson D, Guenther A, Hewitt CN, Steinbrecher R. Biogenic emissions in Europe estimates and uncertainties. J Geophys Res 1995 ; 100 : 22875-90.
7. Mc Innes G (ed). Joint EMEP/CORINAIR. Atmospheric Emission Inventory Guidebook, 1st ed., Europ Environ 1996. Agency, Copenhagen, Denmark.
8. Olendrzynski K. Emissions, in EMEP MSC-W report 1/97, Transboundary air pollution in Europe. Part 1 : Emissions, dispersion and trends of acidifying and eutrophying agents. Berge E. (ed), Norwegian Meteorological Institute 1997, Oslo, Norway.
9. Ortiz A, Dory MAG. The estimation of non methane VOC emissions from nature in Spain for CORINAIR inventory. EMEP workshop on international Emission Inventories 1990 : 233-56.
10. Anastasi C, Hopkinson L, Simpson VJ. Natural volatile organic substances and their effect on air quality in the United States. Atmos Environ 1991 ; 17 : 2131-65.
11. Pistikopoulos P, Moussiopoulos N, Tsilingiridis G. Spatial Distribution and Temporal Variation of Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC) from Greek Forests. TNO/EURASAP workshop on the reliability of VOC emission databases, 1993 : 179-88.
12. Andréani-Aksoyoglu S, Keller J. Estimates of monoterpene and isoprene emissions from the forest in Switzerland. J Atmos Chem 1995 ; 20 : 71-87.
13. Simpson D, Winiwarter W, Börjesson G, Cinderby S, Ferreiro A, Guenther A, Hewitt N, Janson R, Khalil MAK, Owen S, Pierce TE, Puxbaum H, Shearer M, Skiba U, Steinbrecher R, Tarrason L, Öquist MG. Inventorying emissions from nature in Europe. J Geophys Res 1999 ; 104 : 8113-52.
14. Pierce T. User's guide to the personal computer version of the biogenic emissions inventory system (PC-BEIS). EPA/600/8-90/084, US Environmental Protection Agency 1990, Research Triangle Park, NC27711, 1990.
15. Pierce T, Waldruff P. PC-BEIS : a personal computer version of the biogenic emission inventory system. J Air Waste Man Ass 1991 ; 41 : 937-41.
16. Benjamin MT, Sudol M, Bloch L, Winer AM. Low-emitting urban forests : a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. Atmos Environ 1996 ; 30 : 1437-52.
17. Kesselmeier J, Schäfer L, Ciccioli P, Brancaleoni E, Cecinato A, Frattoni M, Foster P, Jacob V, Denis J, Fugit J.L, Dutaur L, Torres L. Emission of monoterpenes and isoprene from a mediterranean oak species *Quercus ilex* L. measured within the BEMA (Biogenic Emission in the Mediterranean Area) project. Atmos Environ 1996 ; 30 : 1841-50.
18. Bertin N, Staudt M, Hansen U, Seufert G, Ciccioli P, Foster P, Torres L. The BEMA-project : Diurnal and seasonal course of monoterpene emissions from *Quercus ilex* under natural conditions-application of light and temperature algorithms. Atmos Environ 1997 ; 31 : 5135-44.
19. IFN : Inventaire Forestier National : Agreste. Données chiffrées. Agriculture n° 105. Juin 1998. SCEES. Paris.
20. Guenther AB, Monson RK, Fall R. Isoprene and monoterpene emission rate variability : Observations with eucalyptus and emission rate algorithm development. J Geophys Res 1991 ; 96 : 10799-808.
21. Guenther AB, Zimmerman PR, Harley PC. Isoprene and monoterpene emission rate variability : model evaluations and sensitivity analyses. J Geophys Res 1993 ; 98 : 12609-17.
22. Guenther AB. Seasonal and spatial variation in natural volatile organic compound emissions. Ecological Application 1997 ; 7 : 34-45.

23. Loreto F, Ciccioli P, Cecinato A, Brancaleoni E, Frattoni M, Fabozzi C, Tricoli D. Evidence of the photosynthetic origin of monoterpenes by *Quercus ilex* L. leaves by ^{13}C labelling. *Plant Physiol* 1996 ; 110 : 1317-22.
24. Kesselmeier J, Bode K, Schäfer L, Schebeske G, Wolf A, Brancaleoni E, Cecinato A, Ciccioli P, Frattoni M, Dutaur L, Fugit JL, Simon V, Torres L. Simultaneous field measurements of terpene and isoprene emissions from two dominant Mediterranean oak species in relation to a north American species. *Atmos Environ* 1998 ; 32 : 1947-53.
25. Rabong R, Steinbrecher R. VOC emissions from selected Oak trees and from Pseudo-Steppe vegetation types ; VOCs and peroxides above an Oak/Pine forest at Castelporziano, Rome. EUR Report 16293 EN, Office for official publications of the European Communities, Luxembourg 1995 : 151-72.
26. Seufert G, Bartzis J, Bomboi T, Ciccioli P, Cieslik S, Dlugi R, Foster P, Hewitt CN, Kesselmeier G, Kotzias D, Lenz R, Manes F, Perez Pastor R, Steinbrecher R, Torres L, Valentini R, Versino B. An overview of the Castelporziano experiments. *Atmos Environ* 1997 ; 31 [SI] : 5-17.
27. Steinbrecher R, Hauff K, Rabong R, Steinbrecher J. The BEMA-project : Isoprenoid emission of oak species typical for the Mediterranean area : Source strength and controlling variables. *Atmos Environ* 1997 ; 31 [SI] : 79-88.
28. Pio CA, Nunes TV, Brito S. Volatile hydrocarbon emissions from common and native species of vegetation in Portugal. Air Pollution Research Report 47, Joint Workshop CEC/BIATEX of EUROTRAC, General assesement of biogenic emissions and deposition of nitrogen compounds, sulphur compounds and oxidants in Europe 1993 : 291-8.
29. BEMA. Biogenic Emission in the Mediterranean Area. *Atmos Environ Special Issue* 1997 ; 31(S1) : 1-256.
30. Steinbrecher R, Schurmann W, Schreiner AM, Ziegler H. Terpenoid emissions from Common Oak (*Quercus robur* L.) and Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst). Proceedings of joint CEC/BIATEX Workshop of the General Assessment of Biogenic Emissions and Deposition of Nitrogen Compounds and Oxidant in Europe, J Slanina et al. (eds), Environmental Research Programme Report 1993 ; 47 : 251-61.
31. Isidorov VA. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of boreal forests : composition, emission rates, estimation of regional emission and photocatalytic transformation. *Ecological Bulletins* 1992 ; 42 : 71-6.
32. König G, Brunda M, Puxbaum H, Hewitt CN, Duckham C, Rudolph J. Relative contribution of oxygenated hydrocarbons to the total biogenic VOC emissions of selected mild-European agricultural and natural plant species. *Atmos Environ* 1995 ; 29 : 861-74.
33. Hakola H, Rinne J, Laurila T. The hydrocarbon emission rates of tea-leaved Willow (*Salix phylicifolia*), silver Birch (*Betula pendula*) and European Aspen (*Populus tremula*). *Atmos Environ* 1998 ; 32 : 1825-33.
34. Hewitt CN, Street RA. A qualitative assessment of the emission of non methane hydrocarbon compounds from the biosphere to the atmosphere in the United Kingdom : Present knowledge and uncertainties. *Atmos Environ* 1992 ; 26A : 3069-77.
35. Nunes TV, Pio CA. Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests. *Chemosphere* 1999 (*In press*).
36. Street RA, Owen S, Duckham SC, Boissard C, Hewitt CN. The BEMA project : effect of habitat and age on variations in emissions from *Quercus ilex* and *Pinus Pinea*. *Atmos Environ* 1997 ; 31 (SI) : S79-S88.
37. Guenther AB, Zimmerman PR, Wildermuth M. Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland landscapes. *Atmos Environ* 1994 ; 28 : 1197-210.
38. Luchetta L. Caractérisation et quantification dans la basse atmosphère de composés organiques volatils biogéniques et anthropiques. Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique, Toulouse, France 1999.
39. Isidorov VA, Zenkevitch IG, Ioffe BV. Volatile organic compounds in the atmosphere of forests. *Atmos Environ* 1985 ; 19 : 1-8.
40. Kempf K, Allwine E, Westberg H, Claiborn C, Lamb B. Hydrocarbon emission from Spruce species using environmental chamber and branch enclosure methods. *Atmos Environ* 1996 ; 30 : 1381-9.
41. Benjamin MT, Winer AM. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmos Environ* 1998 ; 32 : 53-68.
42. Lindskog A, Potter A. Terpene emission and ozone stress. *Chemosphere* 1995 ; 30 : 1171-81.
43. Janson R. Monoterpene emissions from Scots Pine and Norwegian Spruce. *J Geophy Res* 1993 ; 98 : 2839-50.

44. Knöppel H, Versino B, Peil A, Schauenburg H, Vissers H. Quantitative determination of terpenes emitted by conifers. Proc. 2nd Eur Symp on Phys-Chem. Behaviour of Atmosph Pollutants, Varese 1981 : 89-98.
45. Janson R. Monoterpene concentrations in and above a forest of Scots pine. J Atmos Chem 1992 ; 14 : 385-94.
46. Steinbrecher R, Ziegler H, Eichstädter G, Fehsenfeld U, Gabriel R, Kolb CH, Rabong R, Schönwitz R, Schürmann W. Monoterpene and isoprene emission in Norway spruce forests. In : EUROTRAC, Biosphere-Atmosphere Exchange of Pollutants and Trace Substances (Volume 4), Slanina S (ed) 1997 : 352-65.
47. Steinbrecher R, Rabong R. Emission of terpenoids and C2-C6 Hydrocarbons by Norway Spruce : Phytotron experiments and field studies. The proceedings of EUROTRAC Symposium'94, Borrell PM et al (eds), 1994 SPB Academic Publishing bv, The Hague, Netherlands 1994 : 502-5.
48. Dutaur L. Caractérisation des sources biogéniques des composés organiques volatils contribuant à la pollution photochimique dans le bassin méditerranéen. Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique. Toulouse, France 1996.
49. Street RA, Duckham SC, Boissard C, Hewitt CN. Emissions of VOCs from stressed and unstressed vegetation. In : EUROTRAC, Biosphere-Atmosphere Exchange of Pollutants and Trace Substances, Transport and chemical transformation of pollutants in the atmosphere (Vol. 4), Slanina S (ed) 1996.
50. Evans RC, Tingey ML, Gumpertz ML, Burns WF. Estimates of isoprene and monoterpene emission rates in plants. Bot Gaz 1982 ; 143 : 304-10.
51. Street RA. Ph. D. thesis, Lancaster University, Lancaster, United Kingdom 1995.
52. Corchnoy SB, Arey J, Atkinson R. Hydrocarbon emissions from twelve urban shade trees of the Los Angeles, California, air basin. Atmos Environ 1992 ; 26B : 339-48.
53. Winer AM, Fitz DR, Miller PR, Atkinson R, Brown DE, Carter WPL, Dodd MC, Johnson CW, Myers MA, Neisess K, Poe MP, Stephens ER. Investigation of the role of natural hydrocarbons in photochemical smog formation in California. Final Report A0-056-32 for California Air Resources Board. Statewide Air Pollution Research Center, University of California, Riverside, CA 1983.
54. Pio CA, Nunes TV, Valente AR. Forest emissions of hydrocarbons. In : EUROTRAC, Biosphere-Atmosphere Exchange of Pollutants and Trace Substances, Slanina S (eds) 1997 : 335-41, Berlin, Germany.
55. Pio CA, Nunes TV, Valente AR. Biogenic hydrocarbon emissions from vegetation in a southern European environment. In : Proceedings of EUROTRAC Symposium'96-invited contribution to subproject BIATEX, Borrell PM et al. (eds) 1996.
56. Simon V, Clement B, Riba ML, Torres L. The Landes experiment : Monoterpene emitted from the maritime pine. J Geophys Res 1994 ; 99 : 16501-10.
57. Owen S, Boissard C, Street RA, Duckham C, Csiky O, Hewitt CN. The BEMA project : Screening of 18 Mediterranean plant species for volatile organic compound emissions. Atmos Environ 1997 ; 31[SI] : 101-17.
58. Kesselmeier J, Bode K, Hofmann U, Müller H, Schäfer L, Wolf A, Ciccioli P, Brancaleoni E, Cecinato A, Frattoni M, Foster P, Ferrari C, Jacob V, Fugit JL, Dutaur L, Simon V, Torres L. The BEMA Project : Emission of short chained organics acids, aldehydes and monoterpenes from *Quercus ilex* L. and *Pinus pinea* L. in relation to physiological activities, carbon budget and emission algorithms. Atmos Environ 1997 ; 31 [SI] : 119-34.
59. Duyzer J. Measurements of the emission of monoterpenes from Douglas fir forest. IMW-TNO R93/312, Delft, The Netherlands 1993.
60. Winer AM, Arey J, Atkinson R, Aschmann SM, Long WD, Morrison CL, Olszyk DM. Emission rates of organics from vegetation in California's central Valley. Atmos Environ 1992 ; 26A : 2647-59.
61. Winer AM, Arey J, Aschmann SM, Atkinson R, Long WD, Morrison CL, Olszyk DM. Hydrocarbon emissions from vegetation found in California's Central Valley. Final report, California Air Resources Board Contract No. A732-155, Statewide Air Pollution Research Center, Riverside, CA 1989.
62. Arey J, Winer AM, Atkinson R, Aschmann SM, Long WD, Morrison CL, Olszyk D. Terpenes emitted from agricultural species found in California's central valley. J Geophys Res 1991 ; 96D : 9329-36.
63. Lamb B, Westberg HH, Allwine G. Biogenic hydrocarbons emissions from deciduous and coniferous trees in the United States. J Geophys Res 1985 ; 90 : 2380-90.

64. Winer AM, Dodd MC, Fritz DR, Miller PR, Stephens ER, Neisess K, Meyers M, Brown DE, Johnson CW. Assembling a vegetative hydrocarbon emission inventory for the California South Coast Basin : Direct measurement of emission rates, leaf biomass, and vegetation distribution. Paper presented at 75th Meeting Air Pollut Contr Assoc 1982, New Orleans.
65. Hansen U, Seufert G. The terpenoid emission pattern of *Quercus coccifera* L. coincides with the emission pattern found with *Quercus ilex* L.. Proceedings of EUROTRAC Symposium'96, A contribution to subproject BIATEX, Transport and transformation of pollutants in the troposphere (Volume 2), Borrell PM et al. (eds), Southampton 1996.
66. Steinbrecher R, Hauff K. Isoprene and monoterpene emission from Mediterranean oaks. In : Proceedings EUROTRAC symposium 1996, Borrell P et al. (eds), SPB Acad Publish bv, The Hague, Netherlands 1996 : 229-33.
67. Ciccioli P, Fabozzi C, Brancaleoni E, Cecinato A, Frattoni M, Loreto F, Kesselmeier J, Schäfer L, Bode K, Torres L, Fugit JL. Use of the isoprene algorithm for predicting the monoterpene emission from the Mediterranean holm oak *Quercus ilex* L. : Performance and limits of this approach. J Geophys Res 1997 ; 102 : 23319-28.
68. Hewitt CN, Owen S, Jackson A, King B, Arya R, Wheeler P, Scholefield P. The BEMA project : Summary Report on the BEMA field campaign at Montpellier, June and October 1995. In : Report on the 2nd BEMA Measuring Campaign Montpellier-France-June 1995, Report EUR16449 EN 1996 : 57-64.
69. Dilts SB, Lamb B, Westberg H. Diurnal and Seasonal isoprene emission measurements from an English Oak. Presented at the PNWIS/AWMA Conference, Portland OR, November 1990 : 14-6.
70. Lamb BK, Westberg HH, Quarles T, Flickt DL. Natural Hydrocarbon Emission Rate Measurements from Selected Forest Sites. Report EPA-600/3-84-001, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, January 1984.
71. Zimmerman P. Determination of emission rates of hydrocarbons from indigenous species of vegetation in the Tampa Bay/St Peterburg, Florida area. EPA-904/9-77-028, 1979.
72. Guenther AB. Modeling Biogenic Volatile Organic Compound Emissions to the Atmosphere. In : Reactive Hydrocarbons in the Atmosphere/ed. by Hewitt CN, 97-118, Academic Press, London 1999.
73. Arey J, Winer AM, Atkinson R, Aschmann SM, Long WD, Morrison CL. The emission of (z)-3-hexen-1-ol, (z)-3-hexenylacetate and other oxygenated hydrocarbons from agricultural plant species. Atmos Environ 1991 ; 25A : 1063-75.
74. Cannell MGR. World Forest Biomass and Primary Production Data. Academic Press (ed), New York 1982.
75. Zimmerman P. Testing of hydrocarbon emission from vegetation, leaf litter and aquatic surfaces, and development of a method for compiling biogenic emission inventories. Rep. EPA-450-4-70-004, US Environ Prot Agency, Research Triangle Park, N.C., 1979.
76. Fuentes JD, Wang D, Den Hartog G, Neumann HH, Dann TF, Puckett KJ. Modelled and field measurements of biogenic hydrocarbon emissions from a Canadian deciduous forest. Atmos Environ 1995 ; 29 : 3003-17.
77. Fuentes JD, Wang D, Neumann HH, Gillespie TJ, Den Hartog, Dann TF. Ambient biogenic hydrocarbons and isoprene emissions from a mixed deciduous forest. J Atmos Chem 1996 ; 25 : 67-95.
78. Lamb B, Pierce T, Baldocchi D, Allwine E, Dilts S, Westeberg H, Geron C, Guenther A, Klinger L, Harley P, Zimmerman P. Evaluation of forest canopy models for estimating isoprene emissions. J Geophys Res 1996 ; 101 : 22787-97.
79. Veldt C. Leaf biomass data for the estimation of biogenic VOC emissions. MT-TNO Report, Apeldoorn, The Netherlands 1989 : 89-306.
80. Loreto F, Sharkey TD. On the relationships between isoprene emission and photosynthetic metabolites under different environmental conditions. Planta 1993 ; 189 : 420-4.