

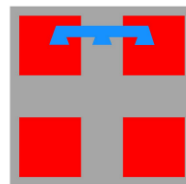


Interreg
ALCOTRA

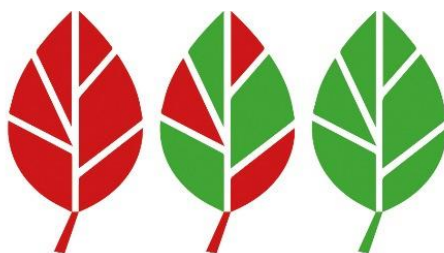
Fonds européen de développement régional
Fondo europeo di sviluppo regionale



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA



**REGIONE
PIEMONTE**



MITIMPACT

**Modellizzazioni a micro e a macroscale dei flussi di ozono,
valutazione e impatti e definizione strategie /
Modélisations à micro et macro définition des fluxes
d’ozone, évaluation des impacts et définition des
stratégies (WP4)**

**Prodotto 4.3.1 Sistema previsionale per la comparsa dei danni da
ozono / Livrable 4.3.1 Système de prévision pour les dégâts causés
par l’ozone**

28/10/2020

Responsabile WP4: Arpa Piemonte

Dipartimento Rischi Ambientali e Naturali
Via Pio VII, 9
10135 Torino - Italia
tel. +39 011 19680448
fax +39 011 19681341
dip.rischi.naturali.ambientali@arpa.piemonte.it
www.arpa.piemonte.gov.it



Gruppo di lavoro:

Francesca Bissardella, Cinzia Cascone, Monica Clemente, Roberta De Maria, Stefania Ghigo, Marilena Maringo

IRET CNR

Istituto di Ricerca sugli Ecosistemi Terrestri (IRET), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)
Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), Italia
TEL: 055 5225921, FAX: 055 5225920



Gruppo di lavoro:

Yasutomo Hoshika, Elena Paoletti, Sofia Martini, Barbara Mariotti, Pierre Sicard*, Alessandra de Marco*

*collaboratori di IRET-CNR

GIEFS (Groupe International d'Études des Forêts sud-européennes)

69 Avenue des Hespérides, 06300 Nice, France.
Tel: 0610726862 – E-mail: legiefs@aol.com



Groupe International d'Etudes
des Forêts Sud-européennes

Gruppo di lavoro:

Svetlana Bicarova, Anumol Govind Shashikumar

4.3 Modellizzazione a microscala dei flussi stomatici di ozono sulla vegetazione e del loro effetto potenziale (IRET CNR) / 4.3 Modélisation à micro-échelle des fluxes stomatiques de ozone et de leurs impact potentiel sur l'environnement (IRET CNR)

4.3.1 Sistema previsionale per la comparsa dei danni da ozono per l'indicatore AOT40

4.3.1 Système de prévision pour les dégâts causés par l'ozone pour l'indicateur AOT40

Per valutare il danno da O₃ sulle piante, si fa riferimento al concetto di livello critico, inteso come livello fissato in base alle conoscenze scientifiche, oltre il quale possono sussistere effetti negativi diretti su recettori quali gli alberi e le altre piante (CLRTAP, 2017). In Europa la principale organizzazione per lo sviluppo del livello critico è l'UNECE ("United Nations Economic Commission for Europe") e la CLRTAP. Gli attuali standard europei utilizzano l'indice AOT40 ("Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb"), che viene calcolato secondo la seguente formula:

$$AOT\ 40 = \sum \max([O_3] - 40, 0) \cdot \Delta t$$

dove [O₃] è la concentrazione oraria di O₃ (ppb), e Δt = 1 ora (Figura 41).

Secondo la direttiva relativa alla qualità dell'aria (direttiva 2008/50/EU), questo indice si basa sulle concentrazioni di O₃ nell'aria eccedenti i 40 ppb nelle ore di luce (radiazione solare maggiore a 50 W m⁻²) della stagione vegetativa (CLRTAP, 2014). In ambito CLRTAP (2014), il livello critico per la protezione delle foreste sulla base dell'AOT40 è stato stabilito in 5000 ppb·h per le specie più sensibili (faggio e betulla) nelle condizioni più favorevoli all'assorbimento di O₃. Questo livello è corrispondente ad una riduzione di biomassa degli alberi del 5%.

Afin d'évaluer le dommage causé par l'O₃ sur les plantes, on fait référence au concept de niveau critique, en tant que niveau déterminé sur la base des connaissances scientifiques, au-delà duquel il peut y avoir des effets négatifs directs sur les récepteurs tels que les arbres et les autres plantes (CLRTAP, 2017). En Europe la principale organisation pour le développement du niveau critique est la CEE-ONU (« Commission économique pour l'Europe des Nations Unies ») et la CPATLD. Les normes européennes actuelles utilisent l'indice AOT40 (« Exposition cumulée au-delà d'une concentration limite de 40 ppb »), qui est calculé selon la formule suivante :

$$AOT\ 40 = \sum \max([O_3] - 40, 0) \cdot \Delta t$$

où [O₃] est la concentration horaire d'O₃ (ppb), et Δt = 1 heure (Figure 41).

Selon la directive concernant la qualité de l'air (directive 2008/50/EU), cet indice se base sur les concentrations d'O₃ dans l'air supérieures à 40 ppb pendant les heures de lumière (rayonnement solaire plus élevé que 50 W m⁻²) de la saison végétative (CLRTAP, 2014). Dans le cadre de la CPATLD (2014), le niveau critique pour la protection des forêts sur la base de l'AOT40 a été établi à 5000 ppb·h pour les essences les plus sensibles (hêtre et bouleau) dans les conditions les plus favorables à l'absorption de O₃. Ce niveau correspond à une réduction de biomasse des arbres de 5%.

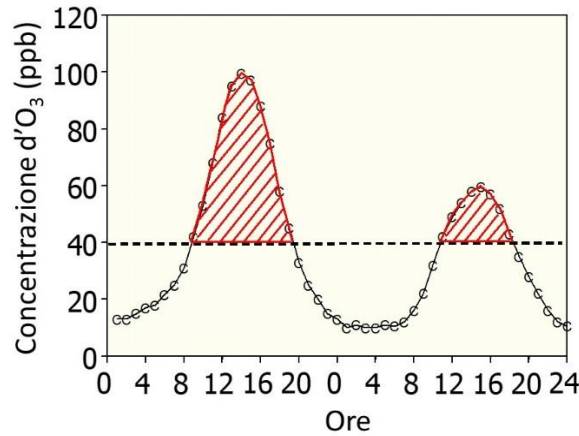


Figura 1: Diagramma concettuale dell'indice AOT40. L'AOT40 si calcola come la sommatoria delle concentrazioni orarie che eccedono i 40 ppb.

Figure 1 : Diagramme conceptuel de l'indice AOT40. L'AOT40 est la somme des concentrations horaires supérieures à 40 ppb.

4.3.2 Sistema previsionale per la comparsa dei danni da ozono, modello DO3SE

4.3.2 Système de prévision pour les dégâts causés par l'ozone, modèle DO3SE

L'utilizzo dell'AOT40 è stato introdotto per evidenziare l'importanza degli effetti cumulativi dell'ozono sul lungo termine. Tuttavia, secondo il parere della comunità scientifica, l'indicatore attuale AOT40 non è appropriato per la valutazione dell'impatto dell'ozono sulle foreste in area mediterranea, dove i livelli di O_3 sono più alti nei momenti in cui gli stomi si chiudono a causa dello stress idrico (Paoletti, 2006; Hoshika et al., 2020b). Inoltre, è stata evidenziata l'estrema sensibilità dell'AOT40 a piccole variazioni della concentrazione di O_3 intorno alla soglia di 40 ppb, situazione tipica di molte zone dell'Europa. Per questo motivo, per l'individuazione dei livelli critici di ozono per le foreste, si è reso necessario passare da un livello critico basato sull'esposizione definito da indicatori quali l'AOT40, ad un livello critico basato su quanto O_3 viene assorbito dalla pianta, cioè il flusso stomatico (CLRTAP, 2017).

Secondo questa concezione il flusso stomatico di O_3 viene cumulato su di un intervallo temporale ed espresso come PODY ("Phytotoxic Ozone Dose"), ovvero la Dose Fitotossica di Ozono sopra una certa soglia di flusso stomatico (Y). Il fattore Y rappresenta una soglia di detossificazione legata ai sistemi di difesa cellulare in grado di impedire il manifestarsi dei danni da O_3 (CLRTAP, 2017). La metodologia per il calcolo della POD è stata messa a punto dall'ICP-Vegetation utilizzando il modello di scambio stomatico, ovvero il DO3SE (Fig. 2).

$$PODY = \sum_{i=1}^n (F_{st,i} - Y) \cdot \Delta t$$

dove PODY (mmol m^{-2}) è il flusso stomatico di O_3 superiore ad una soglia Y, calcolata a partire dai valori orari di flusso stomatico di O_3 (F_{st} , $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), n è il numero di ore nel periodo considerato per il calcolo, e $\Delta t = 1$ ora.

Il flusso stomatico di O_3 (F_{st} , $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) viene calcolato come segue:

$$F_{st} = [O_3] \cdot \left\{ \frac{1}{R_b + R_c} \right\} \cdot \left\{ \frac{g_{sto}}{g_{sto} + g_{ext}} \right\}$$

dove $[O_3]$ è la concentrazione oraria di O_3 (ppb), R_b è la resistenza allo strato limite (s m^{-1}), R_c è la resistenza alla superficie fogliare (s m^{-1}), g_{sto} è la conduttanza stomatica all' O_3 ($\text{mmol } O_3 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e g_{ext} è la conduttanza cuticolare (m s^{-1}).

La stima della conduttanza stomatica (g_{sto} , $\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) è basata su un modello moltiplicativo descritto da Jarvis (1976) e modificato da CLRTAP (2017) come la seguente equazione:

$$g_{sto} = g_{max} \cdot f_{phen} \cdot f_{light} \cdot \max \left\{ f_{min}, \left(f_{temp} \cdot f_{VPD} \cdot f_{SWC} \right) \right\}$$

dove g_{max} è la conduttanza stomatica massima per l' O_3 ($\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Le funzioni f_{phen} , f_{light} , f_{temp} , f_{VPD} e f_{swc} sono indici che esprimono rispettivamente la dipendenza dall'età della foglia, dalla densità di flusso fotonico fotosintetico (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), dalla temperatura dell'aria (T, °C), dal deficit di pressione di vapore (VPD, kPa) e dall'umidità del terreno (SWC, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). La funzione f_{min} rappresenta la conduttanza minima degli stomi.

L'utilisation de l'AOT40 a été introduite pour mettre en évidence l'importance des effets cumulatifs de l'ozone à long terme. Cependant, selon la communauté scientifique, l'indicateur actuel AOT40 n'est pas approprié pour l'évaluation de l'impact de l'ozone sur les forêts dans l'aire méditerranéenne, où les niveaux d' O_3 sont plus élevés au moment où les stomates se ferment à cause du stress hydrique (Paoletti, 2006 ; Hoshika et al., 2020b). En outre, on a souligné la sensibilité extrême de l'AOT40 aux petites variations de la concentration d' O_3 au tour du seuil de 40 ppb, situation typique d'un grand nombre de zones en Europe. Pour cette raison, pour l'identification des niveaux critiques d'ozone pour les forêts, il a été nécessaire passer d'un niveau critique basé sur l'exposition défini par des indicateurs tels que l'AOT40, à un niveau critique basé sur la quantité d' O_3 absorbé par la plante, à savoir le flux stomatique (CLRTAP, 2017). Selon ce concept, le flux stomatique d' O_3 se cumule pendant un intervalle temporel et s'exprime en tant que PODY (« Phytotoxic ozone Dose »), c'est-à-dire la Dose Phytotoxique d'ozone au-dessus d'un seuil donné de flux stomatique (Y). Le facteur Y représente un seuil de détoxification lié aux systèmes de défense cellulaire capables d'empêcher les dommages d' O_3 (CLRTAP, 2017). La méthodologie pour le calcul de la POD a été mise au point par l'ICP-Vegetation en utilisant le modèle d'échange stomatique, c'est-à-dire le DO3SE (Figure 2).

$$\text{PODY} = \sum_{i=1}^n (F_{st,i} - Y) \cdot \Delta t$$

où PODY (mmol m^{-2}) est le flux stomatique d' O_3 supérieur à un seuil Y, calculé à partir des valeurs horaires de flux stomatique d' O_3 (F_{st} , $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), n est le nombre d'heures pendant la période considérée pour le calcul, et $\Delta t = 1$ heure.

Le flux stomatique d' O_3 (F_{st} , $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) est calculé comme il suit :

$$F_{st} = [\text{O}_3] \cdot \left\{ \frac{1}{R_b + R_c} \right\} \cdot \left\{ \frac{g_{sto}}{g_{sto} + g_{ext}} \right\}$$

où $[\text{O}_3]$ est la concentration horaire d' O_3 (ppb), R_b est la résistance à la couche limite (s m^{-1}), R_c est la résistance à la surface foliaire (s m^{-1}), g_{sto} est la conductance stomatique à l' O_3 ($\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) et g_{ext} est la conductance cuticulaire (m s^{-1}).

L'estimation de la conductance stomatique (g_{sto} , $\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) se base sur un modèle multiplicatif décrit par Jarvis (1976) et modifié par CLRTAP (2017) comme dans l'équation suivante :

$$g_{sto} = g_{max} \cdot f_{phen} \cdot f_{light} \cdot \max \left\{ f_{min}, \left(f_{temp} \cdot f_{VPD} \cdot f_{SWC} \right) \right\}$$

où g_{max} est la conductance stomatique maximum pour l' O_3 ($\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Les fonctions f_{phen} , f_{light} , f_{temp} , f_{VPD} et f_{swc} sont des indices exprimant respectivement la dépendance de l'âge de la feuille, de la densité de flux photonique photosynthétique (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), de la température de l'air (T, °C), du déficit de pression de la vapeur (VPD, kPa) et de l'humidité du terrain (SWC, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). La fonction f_{min} représente la conductance minimum des stomates.

Superficie delle foglie

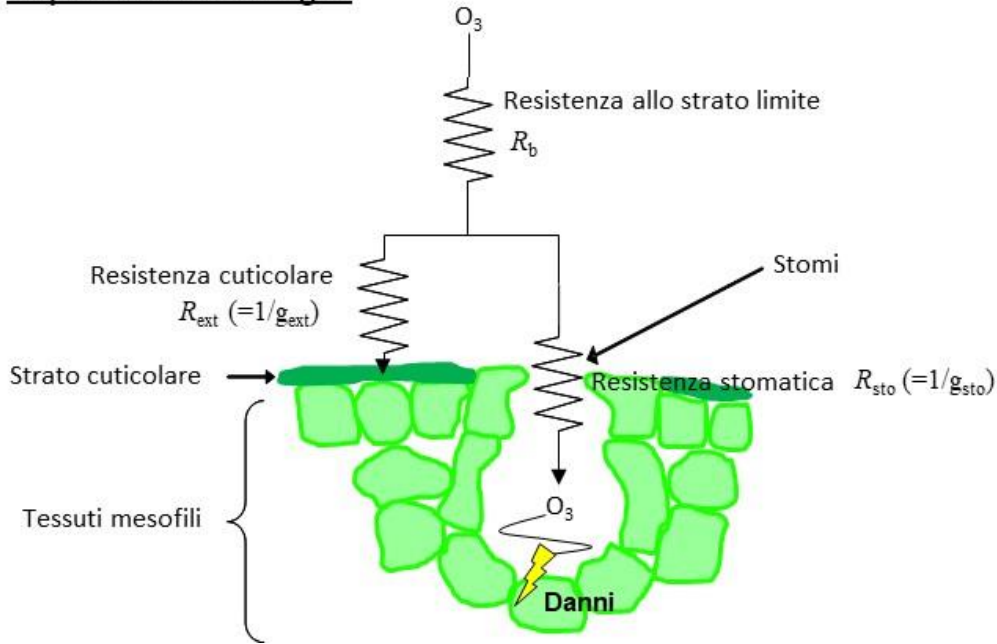


Figura 2: Diagramma concettuale di modello DO3SE. Il flusso stomatico d' O_3 si esprime come l'analogia di resistenza.

Figure 2 : Diagramme conceptuel du modèle DO3SE. Le flux stomatique d' O_3 s'exprime en tant qu'analogie de résistance.

Il modificatore della radiazione solare f_{light} è espresso secondo la seguente formula:

$$f_{light} = 1 - \exp(-light_a \cdot PPFD)$$

dove $light_a$ è un coefficiente basato sulla relazione iperbolica tra conduttanza stomatica e PPFD.

Il modificatore della temperatura, f_{temp} , viene calcolato in base alla temperatura massima (T_{max}), minima (T_{min}) e ottimale (T_{opt}) di apertura degli stomi della specie secondo la seguente formula:

$$f_{temp} = \left(\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right) \left(\frac{T_{max} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{min}} \right)$$

Anche il deficit di pressione di vapore (VPD) influisce sulla conduttanza stomatica ed è calcolata mediante il modificatore del VPD, f_{vpd} , tramite la formula:

$$f_{VPD} = \min \left[1, \max \left\{ f_{min}, \left(\frac{(1 - f_{min}) \cdot (VPD_{min} - VPD)}{(VPD_{min} - VPD_{max})} \right) + f_{min} \right\} \right]$$

dove VPD_{min} e VPD_{max} sono rispettivamente il deficit di pressione del vapore per raggiungere l'apertura stomatica minima e massima.

L'influenza dell'umidità del terreno determina una riduzione della conduttanza stomatica in condizione di siccità, in particolare, in area Mediterranea (Paoletti, 2006) ed il modificatore f_{swc} viene calcolato come segue:

$$f_{swc} = \min \left[1, \max \left\{ f_{min}, (1 - f_{min}) \left(\frac{SWC - WP}{FC - WP} \right) + f_{min} \right\} \right]$$

dove SWC è l'umidità del terreno, WP rappresenta il deficit idrico e FC rappresenta la capacità di campo.

Nell'ambito del progetto MITIMPACT le specie arboree dominanti studiate sono state il faggio (*Fagus sylvatica* L.), il pino cembro (*Pinus cembra* L.) e il pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.). L'UNECE Mapping

Manual ha riassunto i parametri del modello DO3SE per alcune specie arboree, come ad esempio faggio, betula, abete bianco, pino silvestre e leccio (CLRTAP, 2014, 2017).

Per due delle tre specie target di progetto, faggio e pino silvestre, sono stati utilizzati i parametri presenti nel Mapping Manual dell'UNECE (Tabella 1), mentre per la terza specie, il pino cembro, le informazioni per l'applicazione del modello non erano disponibili. Per ovviare a questa mancanza, è stata effettuata una ricerca bibliografica per derivare i parametri relativi alla specie sintomatiche (Tab. 1). Inoltre, per quanto riguarda i rilievi LESS (*Light Exposed Sampling Site*), effettuati per calcolare la percentuale delle specie sintomatiche presenti nei siti, sono state censite le varie specie arboree e arbustive.

La dose fitotossica di O₃ (PODY) è stata calcolata applicando due soglie:

- Y di 1 nmol O₃ m⁻² s⁻¹ (POD1) suggerita dall'UNECE Mapping Manual della CLRTAP;
- Y di 0 nmol O₃ m⁻² s⁻¹ (POD0) calcolata sull'assunto che tutto l'O₃ penetrato all'interno dei tessuti fogliari potrebbe essere metabolizzato nelle foglie (Musselmann et al., 2006).

Le simulazioni sono state eseguite per gli anni 2018 e 2019 utilizzando i dati relativi alla stagione vegetativa (1 maggio – 31 ottobre).

Con i dati forniti dalla stazione integrata MITIMPACT, è stato possibile di modellizzare i flussi stomatici di O₃ a Valle Stura (plot F10), mente negli altri siti di monitoraggio, ubicati nei pressi di Pietraporzio, Pontechianale e Casteldelfino (per un totale di 20 plots) gli indici di ozono sono stati stimati a partire dai dati modellizzati forniti dal partner ARPA Piemonte.

Sempre grazie all'utilizzo dei dati modellizzati e con il contributo di ENEA è stata realizzata la mappatura degli indici di ozono (AOT40 e POD1) per l'anno 2018 per tutto il territorio regionale. Per ognuno dei punti del grigliato (Latitudine: 43.055°-45.575°N, Longitudine: 5.955°-8.025°E; risoluzione 0.03° × 0.03° [longitudine × latitudine]) dove è presente la vegetazione è stato stimato il flusso stomatico di ozono, con lo scopo di sviluppare una mappa della distribuzione spaziale dei valori degli indici di esposizione ed assorbimento d'ozono.

Le modificateur du rayonnement solaire f_{light} s'exprime selon la formule suivante :

$$f_{light} = 1 - \exp(-light_a \cdot PPFD)$$

où $light_a$ est un coefficient basé sur la relation hyperbolique entre conductance stomatique et PPFD.

Le modificateur de la température, f_{temp} , est calculé sur la base de la température maximale (T_{max}), minimale (T_{min}) et optimale (T_{opt}) d'ouverture des stomates de l'espèce selon la formule suivante :

$$f_{temp} = \left(\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \left\{ \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right) \left(\frac{T_{max} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \right\}$$

Le déficit de pression de la vapeur (VPD) influence la conductance stomatique et il est calculé à travers le modificateur du VPD, f_{vpd} , au biais de la formule :

$$f_{VPD} = \min \left[1, \max \left\{ f_{min}, \left(\frac{(1 - f_{min}) \cdot (VPD_{min} - VPD)}{(VPD_{min} - VPD_{max})} \right) + f_{min} \right\} \right]$$

où VPD_{min} et VPD_{max} représentent le déficit de pression de la vapeur pour atteindre l'ouverture stomatique minimum et maximum.

L'influence de l'humidité du terrain détermine une réduction de la conductance stomatique en conditions de sécheresse, notamment dans la zone méditerranéenne (Paoletti, 2006) et le modificateur f_{SWC} est calculé comme il suit :

$$f_{SWC} = \min \left[1, \max \left\{ f_{min}, (1 - f_{min}) \left(\frac{SWC - WP}{FC - WP} \right) + f_{min} \right\} \right]$$

où SWC est l'humidité du terrain, WP représente le déficit hydrique et FC la capacité au champ.

Dans le cadre du projet MITIMPACT, les essences arborées dominantes étudiées ont été le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le pin cembro (*Pinus cembra* L.) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). Le *Mapping Manual* de la CEE-ONU a résumé les paramètres du modèle DO3SE pour certaines essences arborées, par exemple hêtre, bouleau, sapin blanc, pin sylvestre et chêne vert (CLRTAP, 2014, 2017).

Pour deux des trois espèces cible du projet, hêtre et pin sylvestre, on a utilisé les paramètres présents dans le *Mapping Manual* de la CEE-ONU (Tableau 1), alors que pour la troisième essence, le pin cembro, les informations pour l'application du modèle n'étaient pas disponibles. Afin de combler ce manque, on a mené une recherche bibliographique pour identifier les paramètres relatifs aux essences symptomatiques (Tableau 1). En outre, en ce qui concerne les levés LESS (*Light Exposed Sampling Site*), effectués pour calculer le pourcentage des espèces symptomatiques présentes dans les sites, on a recensé les différentes espèces arborées et arbustives.

La dose phytotoxique d'O₃ (PODY) a été calculée en appliquant deux seuils :

- Y de 1 nmol O₃ m⁻² s⁻¹ (POD1) suggéré par le *Mapping Manual* de l'CEE-ONU de la CPATLD ;
- Y de 0 nmol O₃ m⁻² s⁻¹ (POD0) calculé sur la thèse que tout l'O₃ pénétré à l'intérieur des tissus foliaires pourrait être métabolisé dans les feuilles (Musselmann et al., 2006).

Les simulations ont été effectuées pour les années 2018 et 2019 en utilisant les données relatives à la saison végétative (1 mai – 31 octobre).

Grâce aux données fournies par la station intégrée MITIMPACT, il a été possible de modéliser les flux stomatiques d'O₃ à Valle Stura (plot F10), alors que dans les autres sites de suivi, situés à proximité de Pietraporzio, Pontechianale et Casteldelfino (20 plots au total) les indices d'ozone ont été estimés à partir des données modélisées fournies par le partenaire ARPA Piemonte.

Toujours grâce à l'utilisation des données modélisées et avec la contribution d'ENEA, on a réalisé la cartographie des indices d'ozone (AOT40 et POD1) pour l'année 2018 pour tout le territoire régional. Pour chacun des points de la grille (Latitude : 43.055°-45.575°N, Longitude : 5.955°-8.025°E ; résolution 0.03° × 0.03° [longitude × latitude]) où la végétation est présente, on a estimé le flux stomatique d'ozone, dans le but de développer une carte de la distribution spatiale des valeurs des indices d'exposition et absorption d'ozone.

Catégorie	Es. dominante	Es. dominante	Es. dominante	LESS	LESS	LESS
Essence	<i>F. sylvatica</i>	<i>P. cembra</i>	<i>P. sylvestris</i>	<i>Acer sp.</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Fraxinus exersior</i>
Paramètres						
g_{\max} (mmol O ₃ m ⁻² s ⁻¹)	155	75	180	140	240	297
f_{\min} (fraction)	0.13	0.1	0.1	0.12	0.1	0.1
$f_{\text{light_a}}$ (constante)	0.006	0.006	0.006	0.014	0.0042	0.008
T _{opt} (°C)	16	20	20	20	20	27
T _{min} (°C)	5	0	0	0	5	12
T _{max} (°C)	33	40	36	50	200	36
VPD _{max} (kPa)	1	0.5	0.6	1	0.5	2
VPD _{min} (kPa)	3.1	3	2.8	4	2.7	3.6
Références	CLRTAP (2017)	Wieser (2000) Wieser et al. (2000) Köstner et al. (2008) Wieser et al. (2010)	CLRTAP (2014)	Hoshika et al. (2018)	CLRTAP (2017)	Gerosa et al. (2009)

Catégorie	LESS	LESS	LESS	LESS	LESS
Essence	<i>Ribes sp.</i>	<i>Rubus sp.</i>	<i>Salix sp.</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Viburnum sp.</i>
Paramètres					
g_{\max} (mmol O ₃ m ⁻² s ⁻¹)	199	163	150	140	198
f_{\min} (fraction)	0.1	0.1	0.1	0.17	0.1
$f_{\text{light_a}}$ (constante)	0.0035	0.0054	0.003	0.0104	0.0021
T_{opt} (°C)	23	21	30	20	20
T_{\min} (°C)	0	5	0	5	5
T_{\max} (°C)	40	46	40	40	40
VPD _{max} (kPa)	0.8	1.1	0.6	1.2	0.5
VPD _{min} (kPa)	3.6	4.7	2.5	4.7	4
Références	Küppers et al. (1984a,b)	Hoshika et al. (unpublished)	Smith et al. (1991)	Hoshika et al. (2020a)	De Berg (1990)
			Cienciala et al. (1995)		Zhang et al. (2001)
			Lowenstein & Pallardy (1998)		Novak et al. (2007)
			Aasamaa & Sober (2001)		Beikircher et al. (2009)
			Donovan et al. (2001)		Calatayud et al. (2010)
			Aasamaa et al. (2002)		
			Liu et al. (2003)		
			He et al. (2003)		

Tabella 1: Parametri del modello DO3SE in letteratura. Sommario dei parametri del modello DO3SE per le specie dominanti ed i LESS in ambito MITIMPACT.

Tableau 1 : Paramètres du modèle DO3SE en littérature. Sommaire des paramètres du modèle DO3SE pour les essences dominantes et les LESS dans le cadre MITIMPACT.

4.3.3 Relazione Dose/Effetto

4.3.3 Relation Dose/Effet

Generalmente negli studi epidemiologici si procede a un'indagine sui fattori di rischio o le cause che portano al manifestarsi degli effetti negativi. In una procedura di valutazione del rischio si intende verificare se l'esposizione ad una certa sostanza può provocare conseguenze avverse alle piante. Grazie all'attività condotte dal partner IPLA sono state acquisite le informazioni sui danni fogliari visibili (*ozone-like*) e sui gradi di defogliazione della chioma delle specie dominanti nei siti forestali MITIMPACT.

Il rilievo dei principali indicatori dei danni da O₃ in condizioni reali di campo consentono di ottenere quella che viene definita relazione Dose/Effetto, il cui obiettivo è descrivere come gli effetti negativi riscontrati sulle piante dipendano dalla quantità di assorbimento stomatico d'O₃. In pratica, vengono ricercate le correlazioni statistiche tra indici di O₃ (AOT40, POD0, POD1) e le percentuali degli impatti negativi osservati in foresta (Figura 3). Sulla base delle funzioni Dose/Effetto, viene stabilita la soglia di rischio (CLef). Questa soglia viene definita come il valore dell'indice di O₃ (AOT40, PODY) corrispondente ai danni presenti su almeno il 15% della superficie fogliare, oppure, a una defogliazione della chioma del 25%, ovvero ai valori che sono correlati ad una notevole riduzione della fotosintesi, oltre il quale non risultano più ulteriori danni né variazioni nella funzionalità della foglia (Hoshika et al. 2012).

En général, dans les études épidémiologiques on mène une enquête sur les facteurs de risque ou les causes qui entraînent les effets négatifs. Lors d'une procédure d'évaluation du risque, on entend vérifier si l'exposition à une substance donnée peut provoquer des conséquences adverses aux plantes. Grâce aux

attività menées par le partenaire IPLA, on a acquis les informations sur les dommages foliaires visibles (*ozone-like*) et sur les niveaux de défoliation du houppier des essences dominantes dans les sites forestiers MITIMPACT.

Le levé des principaux indicateurs des dommages d'O₃ dans des conditions réelles de terrain permet d'obtenir la relation Dose/Effet, dont l'objectif est décrire comment les effets négatifs relevés sur les plantes dépendent de la quantité d'absorption stomatique d'O₃. Pratiquement, on cherche les corrélations statistiques entre les indices d'O₃ (AOT40, POD0, POD1) et les pourcentages des impacts négatifs observés dans la forêt (Figure 3). Sur la base des fonctions Dose/Effet, on établit le seuil de risque (Clef) qui est défini en tant que valeur de l'indice d'O₃ (AOT40, PODY) correspondant aux dommages présents sur au moins 15% de la surface foliaire, ou, à une défoliation du houppier de 25%, c'est-à-dire des valeurs qui sont liées à une réduction remarquable de la photosynthèse, au-delà duquel il n'y a plus d'ultérieurs dégâts ni de variations de la fonctionnalité de la feuille (Hoshika et al. 2012).

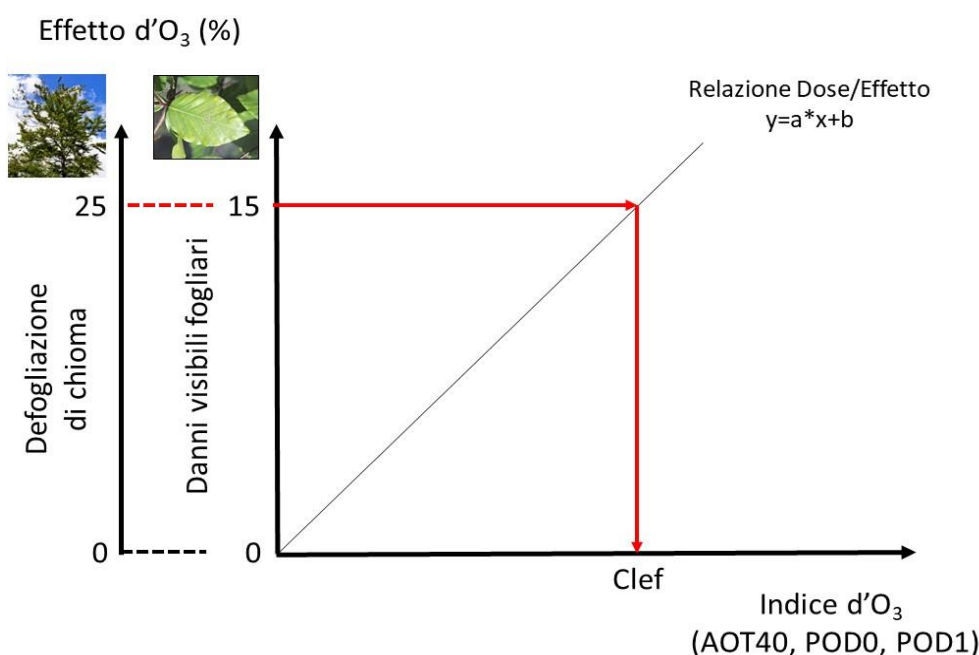


Figura 3: Diagramma concettuale della relazione Dose/Effetto.

Figure 3 : Diagramme conceptuel de la relation Dose/Effet.

Ai fini di progetto, i dati relativi alla defogliazione della chioma sono stati divisi in quattro livelli (FAO, 2014; Eichhorn et al., 2016):

- 0-10%: non defogliato;
- 11-25%: leggermente defogliato;
- 26-60%: moderatamente defogliato;
- 61-100%, severamente defogliato.

In accordo con i criteri dell'ICP-Forests, la defogliazione maggiore del 25% va considerata come indice di una pessima condizione di salute della foresta. Quindi, come già accennato precedentemente, la soglia Clef per entrambi gli indicatori è rappresentata da valore degli indici di O₃ corrispondenti alla defogliazione della chioma pari al 25%.

A la fin du projet, les données relatives à la défoliation du houppier ont été divisées en quatre niveaux (FAO, 2014 ; Eichhorn et al., 2016) :

- 0-10% : non défolié ;
- 11-25% : légèrement défolié ;
- 26-60% : modérément défolié ;
- 61-100% : sévèrement défolié.

Conformément aux critères de l'ICP-Forests, la défoliation supérieure à 25% doit être considérée un indice d'une très mauvaise condition de santé de la forêt. Donc, comme déjà mentionné précédemment, le seuil Clef pour les deux indicateurs est représenté par une valeur des indices d'O₃ correspondants à la défoliation du houppier égale à 25%.

4.3.4 Nuovi livelli critici per la protezione delle foreste dall'ozono in Piemonte

4.3.4 De nouveaux niveaux critiques pour la protection des forêts de l'ozone au Piémont

Nelle Figure 4 e 5 sono riportati gli indici di ozono (AOT40, POD0, POD1) per i LESS e le specie dominanti presenti nei siti forestali MITIMPACT, calcolati utilizzando i dati modellizzati e misurati durante le due campagne di misura (2018 e 2019). I valori maggiori di AOT40 sono stati osservati nel plot F10 (Valloriate, AOT40 = 25000~30000 ppb·h) a prescindere dagli anni osservati. In verde e blu si riportano per lo stesso periodo rispettivamente i valori di POD0 e POD1.

Per i LESS, i valori maggiori di POD sono stati registrati nel plot F8 (Demonte) per *Betula pendula*. Per le specie dominanti invece, i valori più alti di POD si osservano per il plot P13 (Pietraporzio) per *Pinus sylvestris*. Dal confronto dei due anni esaminati, si nota come i valori di POD registrati nel 2019 siano minori rispetto al 2018 per tutti i siti forestali mentre i valori di AOT40 erano simili tra le due campagne di misura. Si conferma quindi come i valori degli indici POD non siano correlati significativamente ai valori di AOT40 nell'ambito del progetto MITIMPACT (Figura 6).

Dans les Figures 4 et 5 on montre les indices d'ozone (AOT40, POD0, POD1) pour les LESS et les essences dominantes présentes dans les sites forestiers MITIMPACT, calculés en utilisant les données modélisées et mesurées pendant les deux campagnes de mesure (2018 et 2019). Les valeurs supérieures d'AOT40 ont été observées dans le plot F10 (Valloriate, AOT40 = 25000~30000 ppb·h) indépendamment des années observées. En vert et bleu on indique respectivement les valeurs de POD0 et POD1 pour la même période. Pour les LESS, les valeurs supérieures de POD ont été enregistrées dans le plot F8 (Demonte) pour *Betula pendula*. Par contre, pour les essences dominantes, les valeurs plus élevées de POD peuvent être observées pour le plot P13 (Pietraporzio) pour *Pinus sylvestris*. De la confrontation des deux années étudiées, on remarque que les valeurs de POD enregistrées en 2019 sont inférieures à 2018 pour tous les sites forestiers, alors que les valeurs d'AOT40 étaient similaires entre les deux campagnes de mesure. Donc, on confirme que les valeurs des indices POD ne sont pas liées significativement aux valeurs d'AOT40 dans le cadre du projet MITIMPACT (Figure 6).

LESS

■ AOT40 ■ POD0 ■ POD1

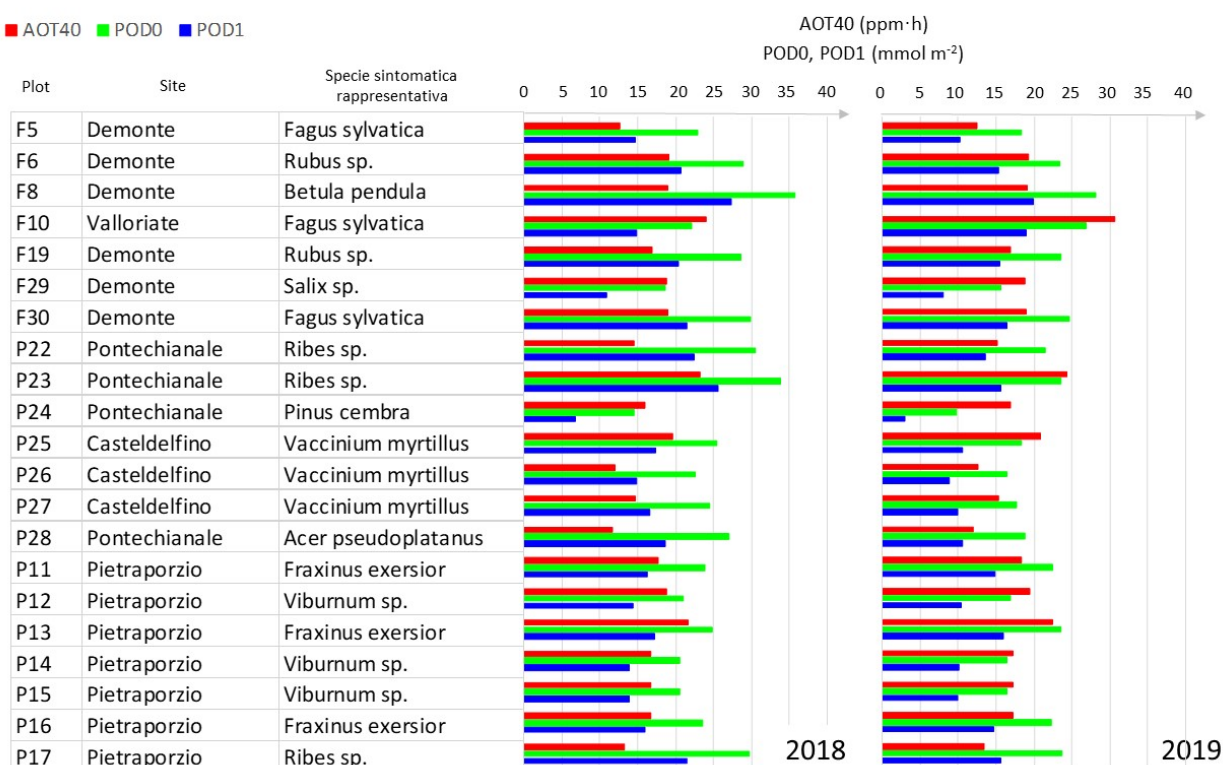


Figura 4: Indici di ozono (AOT40, POD0, POD1) nei LESS.

Figure 4 : Indices d'ozone (AOT40, POD0, POD1) dans les LESS.

Specie dominanti

■ AOT40 ■ POD0 ■ POD1

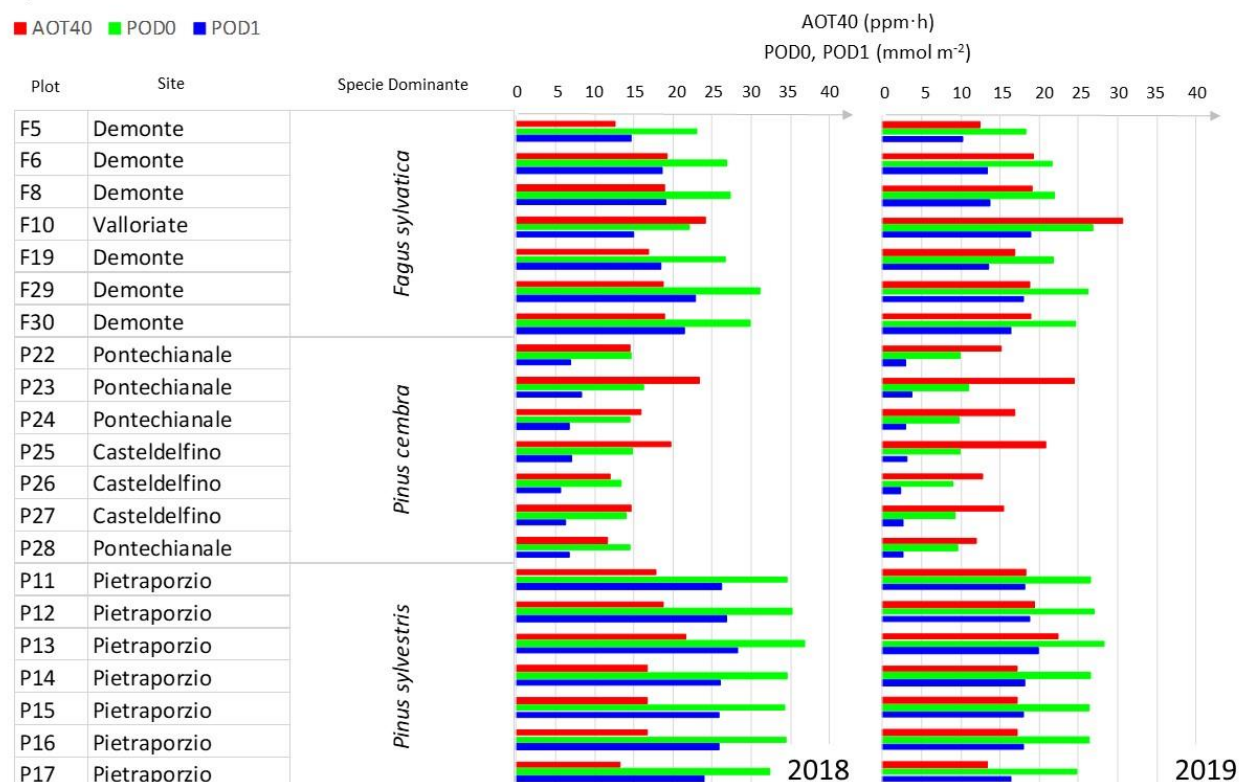


Figura 5: Indici di ozono (AOT40, POD0, POD1) per le specie dominanti (faggio, pino cembro, pino silvestre).

Figure 5 : Indices d'ozone (AOT40, POD0, POD1) pour les essences dominantes (hêtre, pin cembro, pin sylvestre).

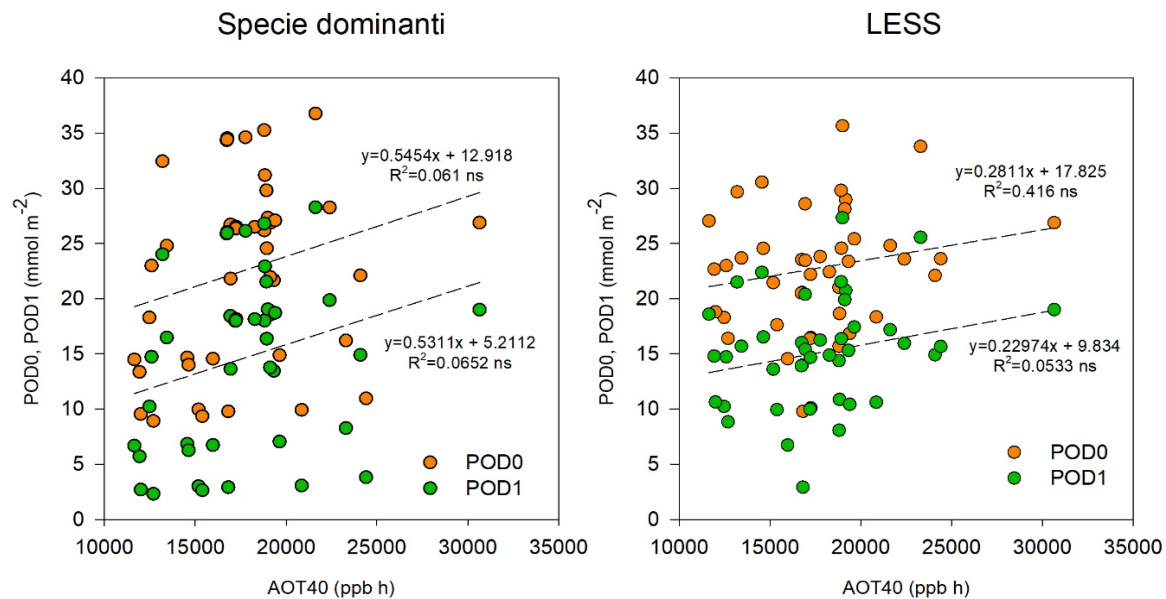


Figura 6: Relazione tra POD e AOT40. I valori di POD non sono significativamente correlati con l'AOT40.

Figure 6 : Relation entre POD et AOT40. Les valeurs de POD ne sont pas significativement liées à l'AOT40.

La relazione risultante tra i dati percentuali di piante sintomatiche nei LESS e gli indici di ozono (AOT40, POD0, POD1) è riportata in Figura 7. Il coefficiente di determinazione R^2 per POD1 era il maggiore tra i tre indici di ozono ($R^2 = 0.26$). Questo risultato ha consentito di verificare l'ipotesi per cui si osservano percentuali di specie sintomatiche più elevate dove i flussi di ozono sono maggiori. Inoltre, si conferma che i danni da ozono osservati erano strettamente collegati con l'assorbimento d'ozono (POD) piuttosto che con la sola esposizione al fattore inquinante (AOT40). È stata infatti ottenuta una relazione maggiormente significativa con la dose stomatica d'ozono (POD0 e POD1) anziché con l'AOT40, che conduceva invece ad una regressione non significativa (con un R^2 di solo 0.06).

È riconosciuto che il danno da ozono dipende dalle specie. È quindi necessario ed essenziale considerare i caratteri specie-specifici per la protezione delle foreste dall'ozono. I valori della conduttanza stomatica sono generalmente più alti per le piante decidue rispetto alle conifere (Hoshika et al., 2018), con conseguente aumento dei valori di flusso stomatico di ozono nelle piante decidue. Nel presente caso di studio le specie arboree/arbustive decidue, piuttosto che conifere e piante sempreverdi (tranne che per il pino cembro) hanno mostrato i sintomi di danno visibili "ozone-like" nei LESS.

Nel Mapping Manual, mancavano le informazioni fondamentali per calcolare i POD delle specie sintomatiche rappresentative nei siti forestali interessati dal progetto MITIMPACT. La nuova parametrizzazione del modello DO3SE riesce a considerare diverse caratteristiche ecologiche e fisiologiche per stimare la dose stomatica di ozono (Tabella 1). I risultati ottenuti dal progetto MITIMPACT consentono di calcolare i livelli critici "biologicamente rilevanti" per la protezione delle foreste dall'ozono in area Mediterranea. Le nuove parametrizzazioni saranno incluse nella nuova versione di Mapping Manual per cambiamenti climatici futuri.

La relation entre les données en pourcentage de plantes symptomatiques dans les LESS et les indices d'ozone (AOT40, POD0, POD1) est indiquée dans la Figure 7. Le coefficient de détermination R^2 pour POD1 était le plus important parmi les trois indices d'ozone ($R^2 = 0.26$). Ce résultat a permis de vérifier l'hypothèse d'après laquelle on observe des pourcentages d'espèces symptomatiques plus élevés où les flux d'ozone sont plus grands. En outre, on confirme que les dommages causés par l'ozone observés étaient strictement liés à l'absorption d'ozone (POD) plutôt qu'à la seule exposition au facteur polluant (AOT40). En effet, on a obtenu une relation plus significative avec la dose stomatique d'ozone (POD0 et POD1) au lieu de l'AOT40, qui menait par contre à une régression non significative (avec un R^2 de 0.06 seulement).

On sait que le dommage causé par l’ozone dépend des essences. Par conséquent, il est nécessaire et essentiel de considérer les caractères essence-spécifiques pour la protection des forêts contre l’ozone. Les valeurs de la conductance stomatique sont généralement plus élevées pour les plantes à feuillage caduc que pour les conifères (Hoshika et al., 2018), avec une augmentation conséquente des valeurs de flux stomatique d’ozone dans les plantes à feuillage caduc. Dans ce cas d’étude, les essences arborées/arbustives à feuillage caduc, plutôt que les conifères et les plantes sempervirentes (sauf le pin cembro) ont montré les symptômes de dommage visibles « *ozone-like* » dans les LESS.

Dans le *Mapping Manual*, il n’y avait pas d’informations fondamentales pour calculer les POD des essences symptomatiques représentatives dans les sites forestiers intéressés par le projet MITIMPACT. La nouvelle paramétrisation du modèle DO3SE considère plusieurs caractéristiques écologiques et physiologiques pour estimer la dose stomatique d’ozone (Tableau 1). Les résultats obtenus par le projet MITIMPACT permettent de calculer les niveaux critiques « biologiquement pertinents » pour la protection des forêts contre l’ozone dans l’aire méditerranéenne. Les nouvelles paramétrisations seront incluses dans la nouvelle version du *Mapping Manual* pour le changement climatique futur.

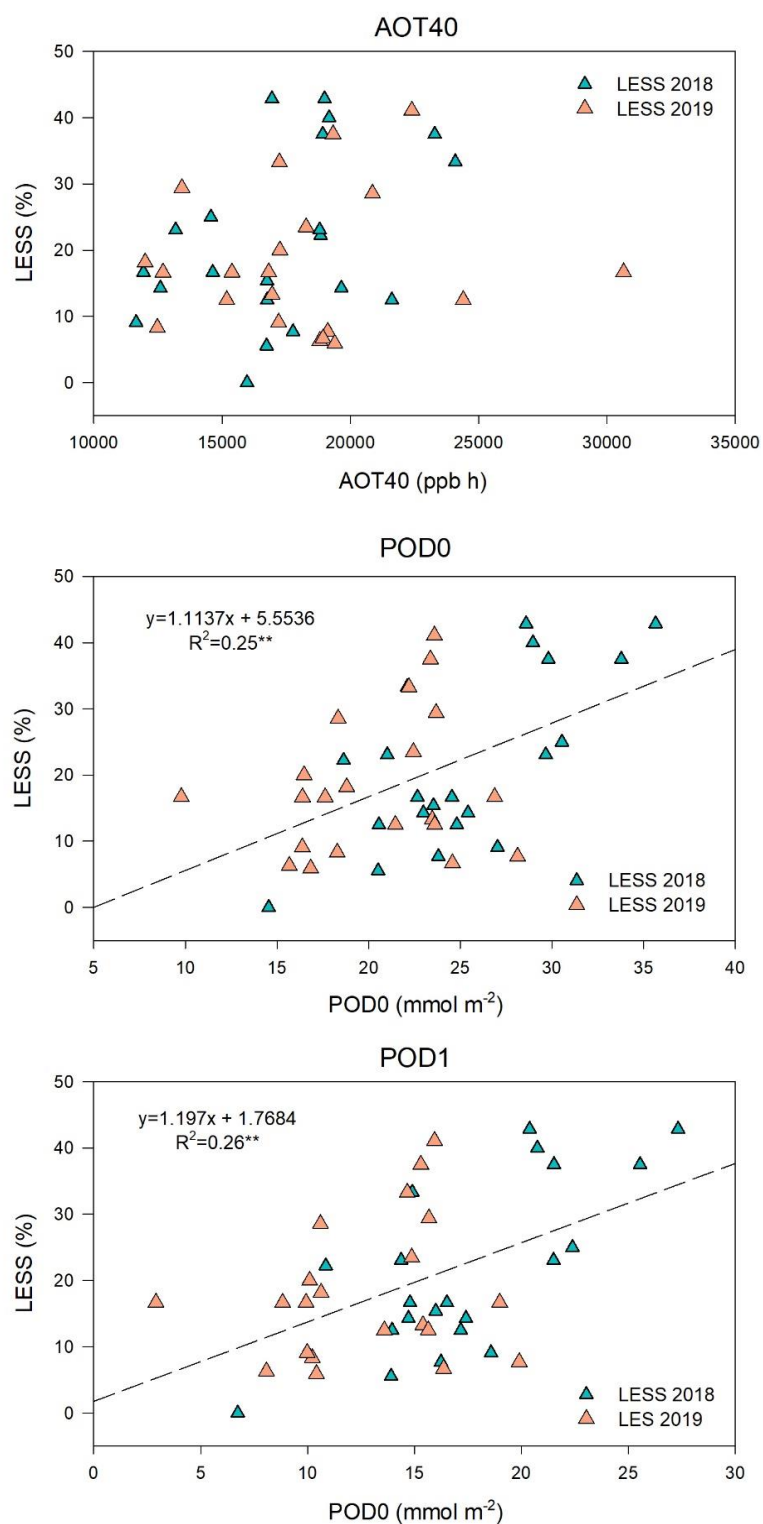


Figura 7: Relazione dose/effetto sui LESS.
Figure 7 : Relation dose/effet sur les LESS.

Le Figure 8 e 9 mostrano le regressioni lineari fra gli indicatori dei danni da ozono per le specie dominanti (numero di foglie danneggiate, defogliazione di chioma) ed indici d'ozono (AOT40, POD0 e POD1). Le relazioni esposizione-danno non ha evidenziato una significatività per tutti i principali indicatori dei danni da ozono (Tab. 2). Per quanto riguarda i POD invece, per il pino cembro e il pino silvestre la regressione lineare con i parametri di danno si dimostra significativa per il numero di foglie danneggiate, ma non per

defogliazione di chioma. Il tasso di aumento delle foglie danneggiate è più intenso per pino cembro (0.48% di foglie danneggiate ogni mmol m^{-2} di POD1) rispetto a pino silvestre (0.08% di foglie danneggiate ogni mmol m^{-2} di POD1), dato che il pino cembro è più sensibile all'ozono rispetto al pino silvestre. Inoltre, si osserva che i danni da ozono nel 2019 appaiono ridotti rispetto al 2018 per le due specie, con conseguente diminuzione dell'assorbimento d'ozono. Questo risultato conferma quanto già osservato in precedenti studi di campo (Paoletti, 2007) e fa ipotizzare che nel secondo anno il periodo di siccità, evidenziato dallo studio dei parametri meteorologici, ha portato ad una aumentata chiusura stomatica con conseguente limitazione dei danni registrati. Per il faggio invece non si trovano regressioni significative tra i parametri principali e gli indici di ozono, né POD né AOT40. Questo risultato è l'espressione di un'estrema ed eccezionale variabilità per i danni fogliari visibili osservati nei siti forestali (Figura 8). Saranno necessarie quindi ulteriori campagne di misura nel lungo termine per determinare un valore di livello critico per il faggio.

Les Figures 8 et 9 montrent les régressions linéaires entre les indicateurs des dommages causés par l'ozone pour les essences dominantes (nombre de feuilles endommagées, défoliation du houppier) et les indices d'ozone (AOT40, POD0 et POD1). Les relations exposition-dommage n'ont pas mis en évidence une caractéristique significative pour tous les principaux indicateurs des dommages causés par l'ozone (Tableau 2). Pour ce qu'il en est des POD, au contraire, pour le pin cembro et le pin sylvestre la régression linéaire avec les paramètres de dommage est significative étant donné le nombre de feuilles endommagées, mais pas pour la défoliation du houppier. Le taux d'augmentation des feuilles endommagées est plus élevé pour le pin cembro (0.48% de feuilles endommagées pour chaque mmol m^{-2} de POD1) par rapport au pin sylvestre (0.08% de feuilles endommagées pour chaque mmol m^{-2} de POD1), vu que le pin cembro est plus sensible à l'ozone que le pin sylvestre. En outre, on observe que les dommages causés par l'ozone en 2019 se sont réduits par rapport à 2018 pour les deux espèces, avec une baisse conséquente de l'absorption d'ozone. Ce résultat confirme ce qui avait déjà été observé dans des études de terrain précédentes (Paoletti, 2007) et mène à supposer que pendant la deuxième année la période de sécheresse, mise en évidence par l'étude des paramètres météorologiques, a engendré une fermeture stomatique plus importante avec une limitation conséquente des dommages enregistrés. Pour le hêtre, par contre, on ne signale pas de régressions significatives parmi les principaux paramètres et les indices d'ozone, ni POD ni AOT40. Ce résultat est l'expression d'une variabilité extrême et exceptionnelle pour les dommages foliaires visibles observés dans les sites forestiers (Figure 8). Donc, d'ultérieures campagnes de mesure à long terme seront nécessaires pour déterminer une valeur de niveau critique pour le hêtre.

Tabella 2: Correlazione tra indici d'ozono (AOT40, POD0 e POD1) e indicatori principali d'ozono.

Tableau 2 : Corrélation entre les indices d'ozone (AOT40, POD0 et POD1) et principaux indicateurs d'ozone.

%	LESS	<i>Fagus sylvatica</i>		<i>Pinus cembra</i>		<i>Pinus sylvestris</i>	
	Essences symptomatiques	n° feuilles endommagées	Défoliation du houppier	n° feuilles endommagées	Défoliation du houppier	n° feuilles endommagées	Défoliation du houppier
AOT40	0.235	-0.0222	-0.2833	-0.1281	0.2531	-0.0385	-0.095
	N=42	N=14	N=14	N=14	N=14	N=14	N=14
	p=.134	p=.940	p=.326	p=.662	p=.383	p=.896	p=.747
POD0	0.5048	-0.4185	-0.2224	0.6053	-0.0432	0.688	-0.3516
	N=42	N=14	N=14	N=14	N=14	N=14	N=14
	p=.001	p=.136	p=.445	p=.022	p=.883	p=.007	p=.218
POD1	0.5074	-0.4285	-0.2112	0.5893	-0.0368	0.6878	-0.3519
	N=42	N=14	N=14	N=14	N=14	N=14	N=14
	p=.001	p=.126	p=.469	p=.027	p=.901	p=.007	p=.217

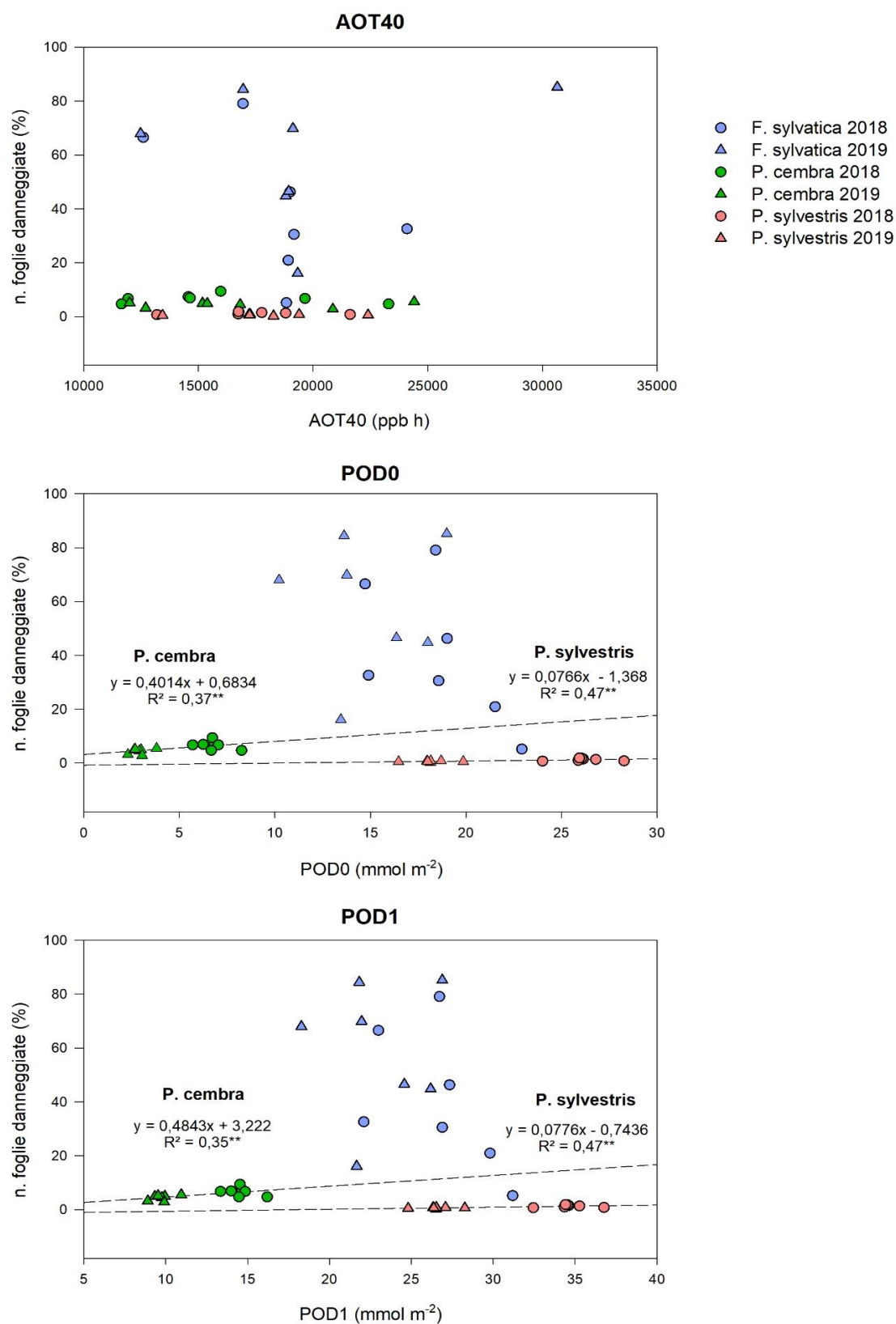


Figura 8: Relazione dose/effetto per numero di foglie danneggiate per le specie dominanti (faggio, pino cembro, pino silvestre).

Figure 8 : Relation dose/effet pour nombre de feuilles endommagées pour les essences dominantes (hêtre, pin cembro, pin sylvestre).

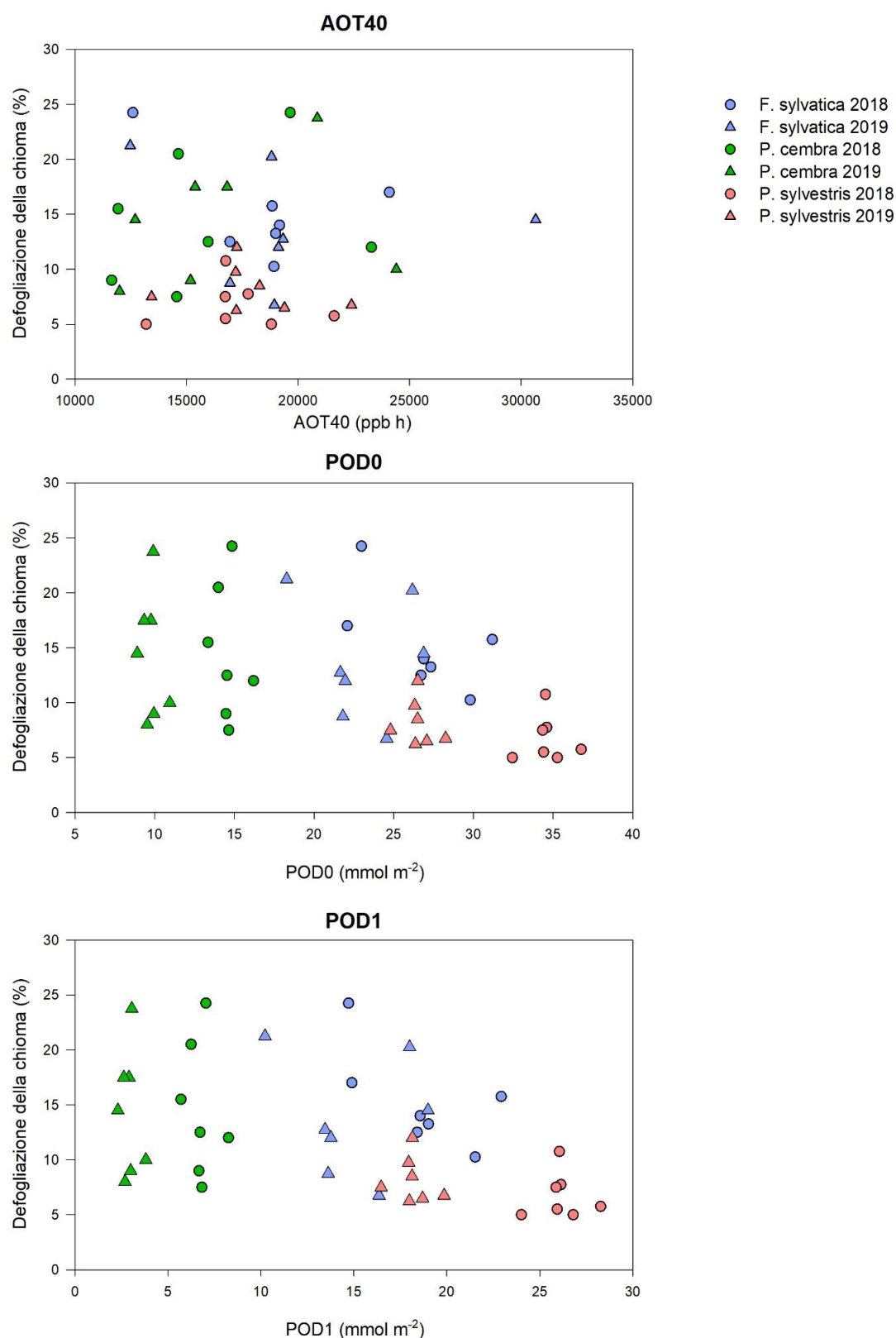


Figura 9: Relazione dose/effetto per defogliazione di chioma delle specie dominanti (faggio, pino cembro, pino silvestre).

Figure 9 : Relation dose/effet pour défoliation du houppier des essences dominantes (hêtre, pin cembro, pin sylvestre).

Le relazioni dose/effetto indicano 11.0 mmol m^{-2} di POD1 corrispondenti a 15% delle specie sintomatiche comparse nei LESS. Inoltre, vengono osservati danni fogliari visibili del 15% quando i valori di POD1 raggiungono 24.3 mmol m^{-2} e $202.9 \text{ mmol m}^{-2}$ rispettivamente per pino cembro (specie sensibile) e pino silvestre (specie resistente). Sintetizzando questi risultati, i livelli critici (CL) a cui l'ozono può causare un effetto deleterio sulle piante forestali è stimato a **11.0 mmol m^{-2} POD1 come CL1** (Comparsa dei danni fogliari visibili), **24.3 mmol m^{-2} POD1 come CL2** (Danni significativi per specie sensibili) e **$202.9 \text{ mmol m}^{-2}$ POD1 come CL3** (Danni significativi per specie resistenti). Questi valori ottenuti nel progetto MITIMPACT sono i **CL realistici per la protezione delle foreste dall'ozono**, dato che sono valori derivati da una prova in condizioni di campo reali.

Les relations dose/effet indiquent 11.0 mmol m^{-2} de POD1 correspondant à 15% des essences symptomatiques apparues dans les LESS. En outre, on observe des dommages foliaires visibles de 15% quand les valeurs de POD1 atteignent 24.3 mmol m^{-2} et $202.9 \text{ mmol m}^{-2}$ respectivement pour le pin cembro (essence sensible) et le pin sylvestre (essence résistante). En synthétisant ces résultats, les niveaux critiques (CL) auxquels l'ozone peut causer un effet nuisible sur les plantes forestières sont estimés à **11.0 mmol m^{-2} POD1 comme CL1** (Apparition des dommages foliaires visibles), **24.3 mmol m^{-2} POD1 comme CL2** (Dommages significatifs pour essences sensibles) et **$202.9 \text{ mmol m}^{-2}$ POD1 comme CL3** (Dommages significatifs pour essences résistantes). Ces valeurs obtenues dans le projet MITIMPACT sont **les CL réalistes pour la protection des forêts contre l'ozone**, vu que ce sont des valeurs découlant d'une épreuve en conditions de terrain réelles.

Citazioni / Citations

- (1) Aasamaa, K., Söber, A., 2001. Hydraulic conductance and stomatal sensitivity to changes of leaf water status in six deciduous tree species. *Biologia Plantarum* 44: 65–73.
- (2) Aasamaa, K., Söber, A., Hartung, W., Niinemets, Ü., 2002. Rate of stomatal opening, shoot hydraulic conductance and photosynthetic characteristics in relation to leaf abscisic acid concentration in six temperate deciduous trees. *Tree Physiology* 22: 267–276.
- (3) Beikircher, B., Mayr, S., 2009. Intraspecific differences in drought tolerance and acclimation in hydraulics of *Ligustrum vulgare* and *Viburnum lantana*. *Tree Physiology* 29: 765–775.
- (4) Calatayud, V., Marco, F., Cerveró, J., Sánchez-Peña, G., Sanz, M.J., 2010. Contrasting ozone sensitivity in related evergreen and deciduous shrubs. *Environmental Pollution* 158: 3580–3587.
- (5) Cienciala, E., Lindroth, A., 1995. Gas-exchange and sap flow measurements of *Salix viminalis* trees in short-rotation forest. II. Diurnal and seasonal variations of stomatal response and water use efficiency. *Trees* 9: 295–301.
- (6) CLRTAP, 2014. Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution.
- (7) CLRTAP, 2017. Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution; accessed on 30 Jan 2021 on Web at www.icpmapping.org.
- (8) De Berg, L.G., 1990. Gas exchange of four *Viburnum* species. MSc thesis, University of Northern Iowa, USA.
- (9) Donovan, L., Linton, M.J., Richards, J.H., 2001. Predawn plant water potential does not necessarily equilibrate with soil water potential under well-watered conditions. *Oecologia* 129: 328–335.
- (10) Eichhorn J, Roskams P, Potočić N, Timmermann V, Ferretti M, Mues V, Szepesi A, Durrant D, Seletković I, Schröck H - W, Nevalainen S, Bussotti F, Garcia P, Wulff S, 2016: Part IV: Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 49 p. + Annex [<http://www.icp-forests.org/manual.htm>].

- (11) FAO, 2014. Manual for visual assessment of forest crown condition. Pristina. ISBN 978-92-5-108641-4.
- (12) Gerosa, G., Marzuoli, R., Desotgiu, R., Bussotti, F., Ballarin-Denti, A., 2009. Validation of the stomatal flux approach for the assessment of ozone visible injury in young forest trees. Results from the TOP (transboundary ozone pollution) experiment at Curno, Italy. *Environmental Pollution* 157: 1497–1505.
- (13) He, W.M., Dong, M., 2003. Physiological acclimation and growth response to partial shading in *Salix matsudana* in the Mu Us Sandland in China. *Trees* 17: 87–93.
- (14) Hoshika, Y., Carrari, E., Mariotti, B., Martini, S., De Marco, A., Sicard, P., Paoletti, E., 2020a. Flux-based ozone risk assessment for a Plant Injury Index (PII) in three European cool-temperate deciduous tree species. *Forests* 11: 82.
- (15) Hoshika, Y., Fares, S., Pellegrini, E., Conte, A., Paoletti, E., 2020b. Water use strategy affects avoidance of ozone stress by stomatal closure in Mediterranean trees—A modelling analysis. *Plant, Cell & Environment* 43: 611–623.
- (16) Hoshika, Y., Omasa, K., Paoletti, E., 2012. Whole-tree water use efficiency is decreased by ambient ozone and not affected by O₃-induced stomatal sluggishness. *PLoS One* 7: e39270.
- (17) Hoshika, Y., Osada, Y., De Marco, A., Peñuelas, J., Paoletti, E., 2018. Global diurnal and nocturnal parameters of stomatal conductance in woody plants and major crops. *Global Ecology and Biogeography* 27: 257–275.
- (18) Jarvis, P.G., 1976. Interpretation of variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in field. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London B* 273: 593–610.
- (19) Köstner, B., Matyssek, R., Heilmeyer, H., Clausnitzer, F., Nunn, A.J., Wieser, G., 2008. Sap flow measurements as a basis for assessing trace-gas exchange of trees. *Flora* 203: 14–33.
- (20) Küppers, M., 1984a. Carbon relations and competition between woody species in a Central European hedgerow. I. Photosynthetic characteristics. *Oecologia* 64: 332–343.
- (21) Küppers, M., 1984b. Carbon relations and competition between woody species in a Central European hedgerow. II. Stomatal responses, water use, and hydraulic conductivity in the root/leaf pathway. *Oecologia* 64: 344–354.
- (22) Liu, M.Z., Jiang, G.M., Li, Y.G., Gao, L.M., Niu, S.L., Cui, H.X., Ding, L., 2003. Gas exchange, photochemical efficiency, and leaf water potential in three *Salix* species. *Photosynthetica* 41: 393–398.

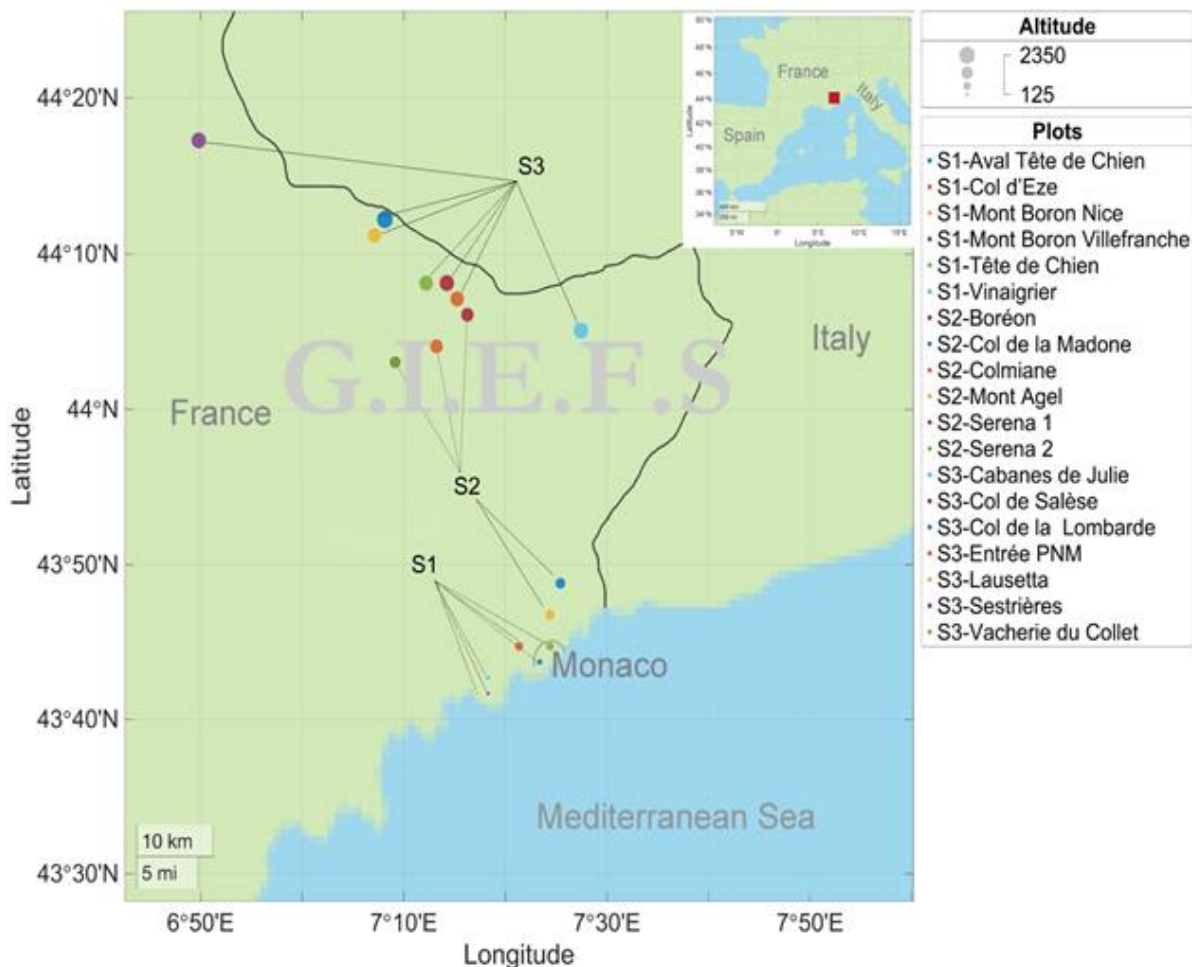
- (23) Lowenstein, N.J., Pallardy, S.G., 1998. Drought tolerance, xylem sap abscisic acid and stomatal conductance during soil drying: a comparison of canopy trees of three temperate deciduous angiosperms. *Tree Physiology* 18: 431–439.
- (24) Musselman, R.C., Lefohn, A.S., Massman, W.J., Heath, R.L., 2006. A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment* 40: 1869–1888.
- (25) Novak, K., Cherubini, P., Saurer, M., Fuhrer, J., Skelly, J.M., Kräuchi, N., Schaub, M., 2007. Ozone air pollution effects on tree-ring growth, $\delta^{13}\text{C}$, visible foliar injury and leaf gas exchange in three ozone-sensitive woody plant species. *Tree Physiology* 27: 941–949.
- (26) Paoletti, E., 2006. Impact of ozone on Mediterranean forests: A review. *Environmental Pollution* 144: 463–474.
- (27) Smith, S.D., Wellington, A.B., Nachlinger, J.L., Fox, C.A., 1991. Functional responses of riparian vegetation to streamflow diversion in the eastern Sierra Nevada. *Ecological Application* 1: 89–97.
- (28) Wieser, G., 2000. Seasonal variation of leaf conductance in a subalpine *Pinus cembra* during the winter months. *Phyton* 40: 185–190.
- (29) Wieser, G., Oberhuber, W., Walder, L., Spieler, D., Gruber, A., 2010. Photosynthetic temperature adaptation of *Pinus cembra* within the timberline ecotone of the Central Austrian Alps. *Annals of Forest Science* 67: 201.
- (30) Wieser, G., Oberhuber, W., Walder, L., Spieler, D., Gruber, A., 2010. Photosynthetic temperature adaptation of *Pinus cembra* within the timberline ecotone of the Central Austrian Alps. *Annals of Forest Science* 67: 201.
- (31) Zhang, J., Ferdinand, J.A., Vanderheyden, D.J., Skelly, J.M., Innes, J.L., 2001. Variation of gas exchange within native plant species of Switzerland and relationship with ozone injury: and open-top experiment. *Environmental Pollution* 113: 177–185.

Calcul des flux stomatiques d'ozone par le modèle DO3SE dans le cadre du projet européen MITIMPACT (GIEFS)

Ce calcul a été réalisé à partir de l'étude menée sur dix-neuf parcelles forestières situées dans le sud-est de la France et réparties dans trois secteurs d'altitude différente durant la période 2017 à 2019 (carte n°1):

- le littoral de la Côte d'Azur (6 sites),
- le moyen pays composé de collines (6 sites),
- et la haute montagne ou haut pays, dans le Parc National du Mercantour (7 sites).

Carte n°1. Carte de la localisation de la zone d'étude en France.



Les concentrations d'ozone autour des sites de surveillance de la végétation ont été mesurées à l'aide de capteurs passifs.

Les symptômes spécifiques de l'ozone sur le feuillage des arbres ont été évalués selon le protocole européen de l'ICP-Forest. Ainsi, ces dommages sont notés en référence à des lésions foliaires connues et spécifiques de l'ozone. Plus généralement également, le déficit foliaire et la décoloration sont suivis pour évaluer l'état de santé de ces essences forestières. Ces dernières étudiées sont: (a) *Pinus halepensis*, (b) *Pinus sylvestris* et (c) *Pinus cembra*.

Les flux d'ozone stomatique sont estimés avec le modèle DO3SE (Deposition of O₃ for Stomatal Exchange). Cela permet de connaître la relation entre la dose réelle absorbée d'ozone au niveau de la surface foliaire via les stomates (dose d'ozone phytotoxique, PODY) et les impacts visibles observés sur le feuillage des arbres (taches chlorotiques, marbrures).

Cette modélisation permet de proposer de nouveaux indicateurs (PODY) de risques liés à l'ozone pour les forêts et d'établir des seuils appropriés de protection des forêts méditerranéennes.

Un algorithme de ce modèle, couplé à la concentration en O₃, intègre les effets de facteurs environnementaux tels que la température de l'air (f_{temp}), le déficit de pression de vapeur (f_{VPD}), le rayonnement solaire ou la lumière (f_{light}) et le potentiel hydrique du sol (f_{SWP}) sur la **conductance stomatique** (G_{sto}).

Détails ci-après :

PODY (Eq.1) est la somme des valeurs horaires du flux stomatique O₃ F_{st} (Eq.2) au-dessus du seuil Y = 1 (POD1), ou sans seuil Y = 0 (POD0), agrégées sur la période entre le début (SGS) à la fin (EGS) de la saison de croissance (1er avril - 30 septembre). Le calcul a été effectué à l'aide de l'algorithme multiplicatif suivant.

$$PODY = \sum_{SGS}^{EGS} [(F_{st} - Y) * (3,600/10^6)] \quad \text{in unit of mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA} \quad (1)$$

$$F_{st} = G_{sto} * c(z_1) * R \quad \text{in unit of nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

$$G_{sto} = G_{max} * f_{ENVI} \quad \text{in unit of mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

Dans l'équation, G_{sto} est la conductance stomatique traduisant le taux de passage d'O₃ entrant à travers les stomates, c (z₁) est la concentration d'O₃ (nmol m⁻³) au sommet de la canopée mesurée à la hauteur de l'arbre (z₁), R est un facteur de résistance comprenant l'effet de la résistance quasi-laminaire et de la résistance de la surface foliaire sur F_{st}, et PLA est la surface foliaire projetée.

Un algorithme de ce modèle, couplé à la concentration en O₃, intègre les effets de facteurs environnementaux f_{ENVI} (Eq.3) tels que la température de l'air (f_{temp}), le déficit de pression de vapeur (f_{VPD}), le rayonnement solaire ou la lumière (f_{lumière}) et l'eau du sol potentiel (f_{SWP}) sur la conductance stomatique maximale. G_{max} a donné des valeurs de G_{sto} (équation 3).

La collecte de paramètres pour le pin d'Alep (Europe méditerranéenne), le pin sylvestre (Europe centrale de l'Atlantique) et la version intégrée de la forêt de conifères (3.0.5) du modèle DO3SE a été utilisée pour le calcul du modèle des valeurs horaires G_{sto}.

Pour le pin cembro, G_{max} a été modifié sur la base d'expériences sur le terrain (Bičárová et al., 2019). Pour le calcul de PODY, l'entrée du modèle nécessite une mesure horaire d'O₃ et des données météorologiques. En raison de la disponibilité uniquement des données mensuelles moyennes d'O₃, nous avons calculé le G_{sto} horaire dans la première étape pour une concentration horaire théorique d'O₃ de 1 ppb. Les données météorologiques horaires ont été dérivées des mesures de METEO-FRANCE dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur par méthode d'approximation.

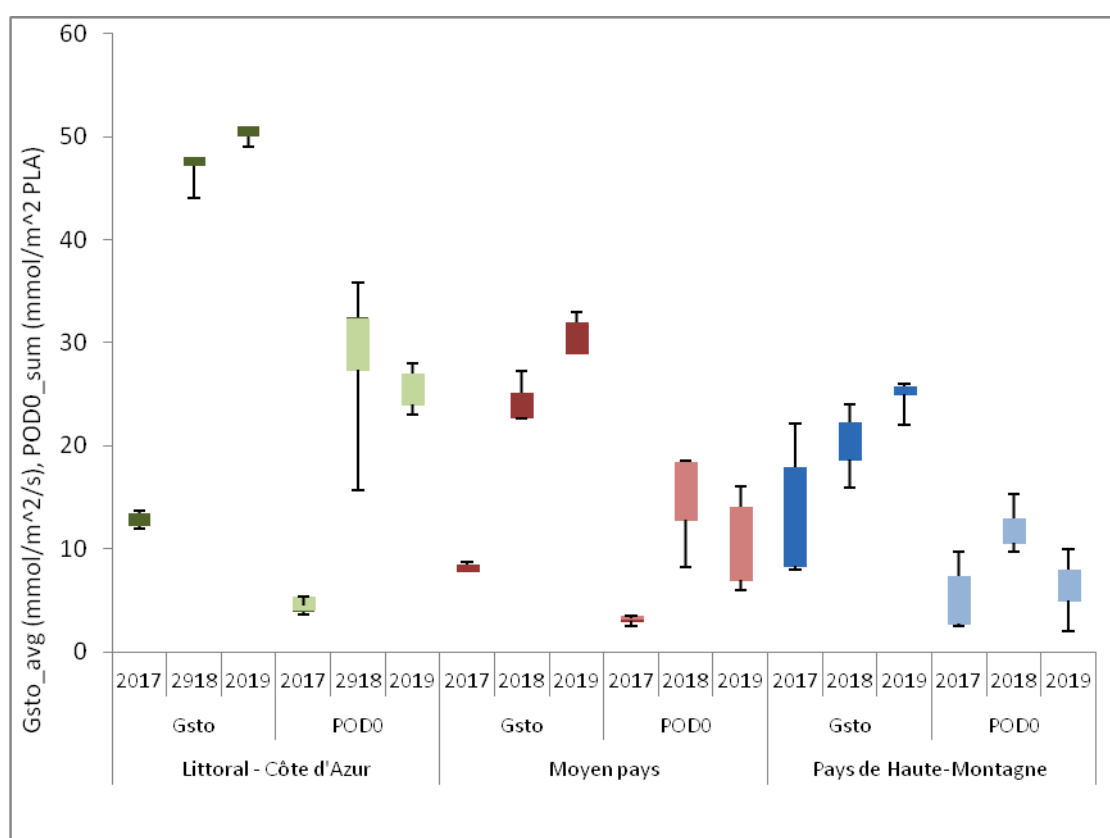
Le traitement des données comprenait les étapes suivantes:

1. Pour préparer les données météorologiques d'entrée pour la température de l'air (Ts, ° C) et l'humidité relative (HR,%), les valeurs ont été dérivées par interpolation linéaire par rapport au gradient altitudinal et calcul suivant de VPD (kPa) pour un Ts donné et HR en utilisant une formule spécifique pour la pression de vapeur saturée et réelle. Les données sur les précipitations (précipitations, mm) et la vitesse du vent (WS, m s⁻¹) ont été obtenues à partir de stations météorologiques proches par rapport aux zones d'altitude. La pression atmosphérique (P, kPa) a été calculée selon la formule barométrique pour une température et une altitude de l'air données. Le rayonnement solaire global (R, W m⁻²) a été dérivé des données mesurées au niveau des stations météorologiques de Nice et de Peone.
2. Compléter les fichiers d'entrée pour l'examen des parcelles forestières contenant des données météorologiques approximativement horaires et une concentration d'O₃ 1ppb.

3. Traitement du modèle DO3SE des fichiers d'entrée pour obtenir les résultats du modèle de conductance stomatique horaire G_{sto} pour les espèces d'arbres *P. halepensis*, *P. sylvestris*, *P. cembra* sur l'ensemble des parcelles forestières.
4. Calcul des valeurs mensuelles moyennes de G_{sto} , du flux stomatique mensuel moyen F_s et enfin de la somme mensuelle de F_s soit POD_0 .

Pour obtenir des résultats plus précis du POD_0 , la mesure des données d'entrée doit être réalisée dans des parcelles forestières considérées par pas horaire en utilisant des types d'équipement automatiques à la fois pour les variables météorologiques et la concentration d'O₃. Les différences entre les échantillonneurs d'O₃ actifs et passifs, par ex. de -14% à 77% lorsque l'on compare les concentrations saisonnières moyennes d'O₃ dans des conditions roumaines (Pitar et al., 2018). De plus, la G_{max} basée sur la mesure de fichier de la conductance stomatique reflétant les conditions climatiques régionales et spécifiques à l'espèce ainsi que la mesure sur le terrain de SWP pour une entrée directe dans le modèle multiplicatif a amélioré les résultats du modèle POD_0 .

Figure 1: Résultats des POD_0 ($\text{mmol/m}^2 \text{ PLA-Projected leaf area}$), modélisation de la conductance stomatique, G_{sto} ($\text{mmol/m}^2/\text{s}$) de 2017 à 2019.



Le calcul du flux stomatique montre que le POD_0 et la conductance stomatique (G_{sto}) sont influencés par des facteurs environnementaux, principalement les précipitations et la capacité à retenir l'eau de pluie dans le sol (f_{SWP}). En 2017, les parcelles qui ont reçu le moins de pluie ont montré un faible niveau de POD_0 et de G_{sto} alors qu'en 2018 et 2019, lorsque ces parcelles ont reçu une quantité considérable de précipitations, l'absorption de l'ozone et le POD_0 ont augmenté (Fig 1). La corrélation entre la matrice de flux d'ozone et les variables environnementales avec les indicateurs de réponse des forêts par le test de classement de Spearman montre que *P.cembra* est l'une des espèces les plus sensibles à la concentration et à la variabilité de l'ozone.

Publications:

Bičárová, S., *et al.*, 2019. The role of environmental factors in ozone uptake of *Pinus mugo* Turra. *Atmospheric Pollution Research*. 10, 283-293.