



**HAL**  
open science

## Contribution à la modélisation du risque scolyte

Pauline Colombet

► **To cite this version:**

Pauline Colombet. Contribution à la modélisation du risque scolyte. Informatique [cs]. 2024. dumas-04787879

**HAL Id: dumas-04787879**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04787879v1>**

Submitted on 18 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES  
de BORDEAUX AQUITAINE  
1, cours du Général de Gaulle - CS40201 - 33175 GRADIGAN cedex

---

**MEMOIRE de fin d'études**  
*pour l'obtention du titre*  
*d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro*

---

**Contribution à la modélisation du risque scolyte**

*par :*

**Pauline Colombet**

Spécialisation : AgroTIC

Étude réalisée à : UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 500 Rue Jean François Breton, 34090 Montpellier

*Encadrement :*

Renaud Marti et Annelise Tran (maîtres de stage)  
Hazaël Jones (tuteur école)

-2024-





The French Ministry of Agriculture

NATIONAL SCHOOL of AGRICULTURAL SCIENCES and ENGINEERING, BORDEAUX  
AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS40201 - 33175 GRADIGAN cedex, France

---

## MASTER THESIS

*Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of*  
Agricultural Engineer, Bordeaux Sciences Agro

---

### Contribution to bark beetle risk modelling

Pauline Colombet

Specialisation : AgroTIC

Study completed at : UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 500 Rue Jean François Breton,  
34090 Montpellier

*Supervision :*

Renaud Marti et Annelise Tran (internship supervisors)

Hazaël Jones (school tutor)

-2024-



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes maîtres de stage, Renaud Marti et Annelise Tran, pour leur encadrement, leurs commentaires et remarques avisés, sans oublier leurs encouragements et leur écoute attentive tout au long de ce stage. Merci de m'avoir aidée à confirmer mon désir de travailler dans la recherche. Je suis heureuse de rester au sein de la Maison de la Télédétection pour réaliser ma thèse.

Je remercie également Hazaël Jones, mon tuteur au sein de l'école, pour sa réactivité et ses suggestions constructives, qui ont permis d'améliorer les différents livrables de ce stage de fin d'études.

Je voudrais remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique de la spécialité AgroTIC pour leur pédagogie et leur soutien tout au long de ces dernières années d'école d'ingénieur.

Je tiens également à remercier les personnes qui m'ont apporté leur aide précieuse au cours de ce stage, et plus particulièrement Jean-Baptiste Féret et Florian de Boissieu (UMR TETIS) pour leur assistance dans la compréhension de la chaîne FORDEAD, ainsi que Stéphane Van-Hyfte (Meteo-France) pour sa réactivité et son aide concernant les données AROME et ANAS-TASIA.

Enfin, je remercie chaleureusement mes proches pour leur soutien et leurs encouragements constants tout au long de mes études.

# Plan du mémoire

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte</b>	<b>2</b>
1.1 La crise « scolytes » dans le Nord-Est de la France . . . . .	2
1.1.1 Le début de la crise « scolytes » dans le Grand Est . . . . .	2
1.1.2 Chiffres clés des dégâts économiques . . . . .	2
1.2 Le scolyte typographe ( <i>Ips typographus</i> ) . . . . .	3
1.2.1 Biologie de l'espèce . . . . .	3
1.2.2 Description des stades d'une attaque de typographes . . . . .	7
1.2.3 Moyens de lutte contre le typographe . . . . .	7
1.3 FORDEAD, une chaîne de télédétection pour repérer les foyers de scolytes . . . . .	8
1.3.1 Description de FORDEAD . . . . .	8
1.3.2 Limites de FORDEAD . . . . .	11
1.4 L'utilisation de modèles pour prévoir le risque d'infestation par des scolytes . . . . .	11
1.4.1 Présentation succincte de modèles d'études des scolytes . . . . .	11
1.4.2 RITY-2, un exemple de modèle phénologique de <i>Ips typographus</i> . . . . .	12
1.5 Problématisation . . . . .	13
<b>2 Matériels et méthodes</b>	<b>14</b>
2.1 Zone d'étude . . . . .	14
2.1.1 Choix de la zone d'étude : région Grand-Est . . . . .	14
2.1.2 Choix de la zone de test : maille SENTINEL-2 32ULU . . . . .	14
2.1.3 Restriction aux zones forestières : utilisation du masque Forêt FORDEAD . . . . .	14
2.2 Le modèle phénologique de développement des scolytes utilisé . . . . .	15
2.2.1 Choix du modèle phénologique de développement des scolytes . . . . .	15
2.2.2 Méthode utilisée par RITY-2, cas de la Slovénie (publication initiale) . . . . .	16
2.3 Données d'entrée du modèle phénologique du scolyte typographe : . . . . .	19
2.4 De RITY-2 à RITYPY: développement d'une version open-source . . . . .	21
2.4.1 Choix du langage de programmation . . . . .	21
2.4.2 Implémentation de RITYPY, une version Python de RITY-2 . . . . .	21
2.5 Simulations et sorties du modèle RITYPY . . . . .	24
2.5.1 Simulations quotidiennes . . . . .	24
2.5.2 Sorties cartographiques : cartes des variables phénologiques . . . . .	24
2.6 Méthode de comparaison qualitative des sorties de RITYPY et de FORDEAD . . . . .	25
<b>3 Résultats</b>	<b>27</b>
3.1 Cartes des variables phénologiques du typographe sur les forêts du Grand-Est . . . . .	27
3.2 Comparaison des cartes phénologiques avec les sorties cartographiques FORDEAD . . . . .	29
<b>4 Discussions et Perspectives</b>	<b>35</b>
4.1 Discussion sur les méthodes utilisées . . . . .	35
4.1.1 Sources des données Tmax et alternatives . . . . .	35
4.1.2 La comparaison graphique entre RITYPY et FORDEAD . . . . .	36
4.2 Discussion sur l'utilisation des données de température AROME . . . . .	37

4.3	Adaptation au Grand-Est et à d'autres régions de France hexagonale . . . . .	40
4.4	La complexification du modèle vers un modèle de réaction-diffusion . . . . .	41
	<b>Conclusion</b>	<b>41</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>43</b>
	<b>Annexes</b>	<b>i</b>

## Liste des figures

1	Carte d'occurrence de dommages du typographe . . . . .	2
2	Photographies de scolytes typographes . . . . .	3
3	Galerias creusées par le développement des scolytes . . . . .	5
4	Cycle de vie des scolytes typographes . . . . .	6
5	Photographies d'épicéas attaqués par des scolytes . . . . .	6
6	Illustration du calcul de l'indice CRSWiR . . . . .	9
7	Valeurs du CRSWiR calculé par FORDEAD sur un pixel sain et attaqué . . . . .	10
8	Cartes produites par RITY-2 (Slovénie) . . . . .	13
9	Zone d'étude et zone de test avec masque forêt . . . . .	15
10	Développement d'une population de scolytes selon RITY-2 . . . . .	18
11	Logigramme simplifié de l'algorithme RITYPY . . . . .	23
12	Exemple de comparaison entre FORDEAD et RITYPY . . . . .	26
13	Cartes des variables prédites par RITYPY . . . . .	28
14	Cartes des courbes de niveaux . . . . .	29
15	Localisation des sous-polygones étudiés . . . . .	31
16	Anomalies FORDEAD détectées en 2023 sur les sous-polygones étudiés . . . . .	32
17	Comparaison des anomalies entre FORDEAD et RITYPY (sous-polygone 1) . . . . .	34
18	Comparaison entre FORDEAD et RITYPY (sous-polygone 3) . . . . .	34
19	Différence entre les Tmax et altitudes aux stations et simulées par AROME . . . . .	38
20	Différence de température prédite pour 12h par AROME (06/06/2024) . . . . .	39
21	Différence de température prédite pour 12h par AROME à 3h et 12h pour 2 dates . . . . .	39
22	Comparaison entre FORDEAD et RITYPY (sous-polygone 2) . . . . .	i
23	Comparaison entre FORDEAD et RITYPY (sous-polygone 4) . . . . .	i

## Table des annexes

Comparaison entre FORDEAD et RITYPY sur d'autres sous-polygones	i
---	---

## Listes des abréviations :

- API : *Application programming interface* ou interface de programmation d'application
- CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
- CRSWiR : *Continuum Removal in Short-Wave infraRed*
- dj : degrés-jours
- DSF : Département de la Santé des Forêts
- FORDEAD : *FORest DEgradation And Dieback*
- IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
- INCA : *Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis*
- INRAe : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
- MNT : Modèle Numérique de Terrain
- ONF : Office National des Forêts
- SIG : Système d'Information Géographique
- TETIS : Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale
- Tmax : Température maximale
- UMR : Unité Mixte de Recherche



## **Glossaire :**

- **Émergence** : sortie de l'écorce des jeunes scolytes typographes à la fin de leur développement.
- **Essaimage de printemps (ou essaimage)** : envol au début du printemps des scolytes typographes ayant passé l'hiver dans la litière de la forêt ou l'écorce d'un arbre-hôte.
- **Génération fille** : génération directement issue de la génération fille précédente (appelée génération parentale).
- **Génération soeur** : génération issue de la même génération parentale que la génération fille correspondante et qui se développe en parallèle de cette dernière.
- **Krigeage** : méthode d'interpolation de données spatiales permettant de prédire des valeurs en un point donné à partir des valeurs d'autres points.
- **Phénologie** : étude des événements périodiques du cycle de vie d'un être vivant.
- **Réémergence** : capacité des scolytes typographes adultes à émerger de l'arbre-hôte dans lesquels ils se sont reproduits pour s'envoler de nouveau et aller se reproduire dans un nouvel arbre. Cette réémergence résulte en la naissance d'une génération soeur.

# Introduction

Ces dernières années, les forêts françaises sont de plus en plus touchées par les problèmes sylvo-sanitaires et les forestiers observent une surmortalité des peuplements. Selon les données de l'inventaire forestier de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), la mortalité des arbres a augmenté de près de 80 % en volume entre les périodes 2005–2013 et 2013–2021 (Observatoire des forêts françaises, 2023a). Cette augmentation n'est pas la même pour toutes les essences, et elle touche particulièrement le châtaignier, le frêne et l'épicéa (Observatoire des forêts françaises, 2023a).

La principale cause de cette surmortalité est l'augmentation des épisodes de sécheresses intenses (Observatoire des forêts françaises, 2023b) liée au changement climatique. Cette hausse des températures affaiblit les arbres, les rendant plus vulnérables aux attaques de ravageurs. À l'inverse, les ravageurs dont le cycle de vie dépend de la température se reproduisent et se développent plus rapidement (Observatoire des forêts françaises, 2023b). A cela s'ajoute le système de culture monospécifique (peuplement composé d'une essence à 75 % ou plus), représentant près de la moitié des forêts de production française (Institut National de l'information Géographique et Forestière (IGN), 2022), qui contribue à la prolifération de ces ravageurs. Face à cette augmentation des populations de bioagresseurs, il est nécessaire d'expérimenter de nouvelles approches de détection afin d'orienter au mieux les actions de lutte.

C'est dans ce contexte qu'a été financé le projet SylvoSanSat par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), collaboration entre différents acteurs de gestion de la forêt française, comme l'Office National des Forêts (ONF) et le Département de la Santé des Forêts (DSF), et des organismes de recherche comme l'Institut de Recherche pour Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAe). L'objectif du projet est de développer des méthodes utilisant les produits de télédétection pour prévenir et surveiller les problèmes sylvo-sanitaires.

Dans le cadre de ce projet, l'UMR TETIS, laboratoire de recherche spécialisé dans l'application de la télédétection à des thématiques environnementales, a été sollicitée pour construire une méthode permettant d'identifier les foyers de scolytes typographes (*Ips typographus*), ravageurs de l'épicéa commun, à un stade précoce. Une équipe de TETIS a ainsi développé une chaîne de télédétection, FORDEAD (FORest DEgradation And Dieback), qui permet de détecter et de suivre l'évolution de foyers potentiels de scolytes en identifiant les anomalies de flux hydrique dans la canopée à partir d'images SENTINEL-2 (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a). Cependant, excepté par des confirmations terrain, rien ne permet d'affirmer que ces anomalies sont effectivement la conséquence d'une attaque de scolytes.

Ce mémoire porte sur la construction d'une méthode permettant de contextualiser la détection des anomalies de la chaîne FORDEAD afin de mieux les relier à des attaques de scolytes typographes. Dans un premier temps, une présentation des différents éléments de contexte de la crise « scolytes » et de l'élaboration de la chaîne FORDEAD permettra de problématiser l'étude. Ensuite, les méthodes utilisées seront décrites, et les résultats seront présentés et analysés. Enfin, les limites de la méthode et des résultats seront discutées, et des perspectives d'amélioration seront proposées.

# 1 Contexte

## 1.1 La crise « scolytes » dans le Nord-Est de la France

### 1.1.1 Le début de la crise « scolytes » dans le Grand Est

Depuis 2018, les forêts d'épicéas du Nord-Est de la France subissent de fortes mortalités (Delpont, Albert and Ulrich, 2021). La canicule de 2018, précédée de plusieurs étés secs, a particulièrement touché cette région, ce qui a affaibli les arbres et favorisé le développement de ravageurs (Delpont, Albert and Ulrich, 2021), en particulier celui du scolyte typographe (*Ips typographus*) (figure 1). Ces populations de ravageurs sont habituellement régulées par des prédateurs naturels, mais les sécheresses des printemps et étés suivants (Delpont, Albert and Ulrich, 2021), ajoutées au contexte de peuplement monospécifique de ces forêts (Institut National de l'information Géographique et Forestière (IGN), 2022) ont avantagé leur prolifération (Observatoire des forêts françaises, 2023b).

### 1.1.2 Chiffres clés des dégâts économiques

Les répercussions économiques de cette prolifération des scolytes typographes sur la filière bois sont très importantes. Entre le début de la crise en 2018 et 2022, l'équivalent d'environ 60 000 ha de forêts d'épicéas de Bourgogne-Franche-Comté et du Grand-Est ont été ravagées par les scolytes, soit 34 % de ces forêts (Saintonge, Gillette and Belouard, 2023).

En 2020, 1,8 millions de m<sup>3</sup> d'épicéas récoltés ont été « déclassés » (Office national des forêts, 2023a) et ont donc perdu de leur valeur marchande à cause d'un dépérissement, dont ceux causés par des scolytes typographes. Les arbres concernés par les attaques sont ceux dont le diamètre est supérieur à 25 cm (Département de la Santé des Forêts, 2018), ce qui correspond à des arbres de plus de 20 ans, en âge d'être récoltés (Baumeister et al., 2020). Même si le bois scolyté ne perd pas ses propriétés mécaniques et peut donc être exploité comme du bois sain, la coloration bleu-gris, due à différents champignons véhiculés par l'insecte au cours du travail de forage, provoque une baisse de son prix de vente (Office national des forêts, 2023b). Le champignon accompagnant le plus fréquemment les scolytes typographes est *Ceratocystis polonica* (Siemaszko) (Gouvernement du Canada, 2013). L'augmentation du volume de bois dépérissant sur le marché a par ailleurs entraîné une chute des prix en France et en Europe (Office national des forêts, 2023a).

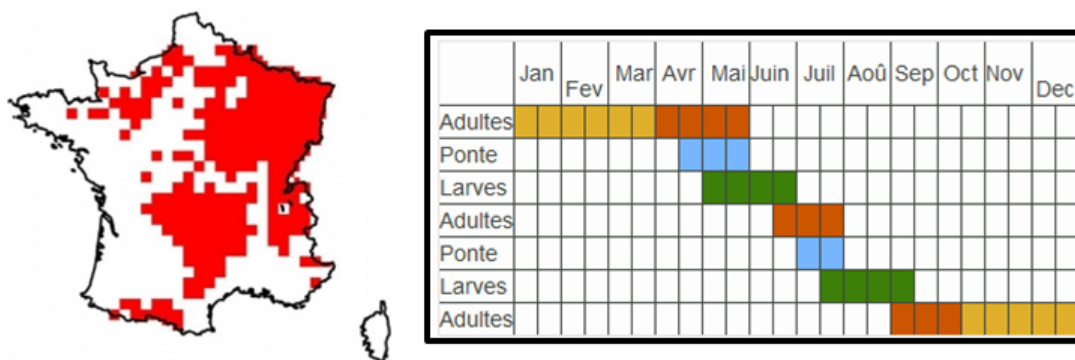


Figure 1: Carte d'occurrence de dommages du typographe, ravageur de l'épicéa commun, en France d'après les observations DSF (gauche), grands stades phénologiques de l'espèce (droite). Source : base en ligne Ephytia (INRAe).



Figure 2: Photographies de scolytes typographes adulte mature (gauche) et larve (droite). Taille indicative de l'adulte : de 4 à 6 mm de long. Sources : (Nageleisen and Grégoire, 2022) et base en ligne Ephytia (INRAe).

Pour mieux comprendre cette crise, il est important de connaître la biologie du ravageur qui en est responsable, le scolyte typographe.

### Synthèse du 1.1

- La crise « scolytes » désigne le dépérissement massif des forêts d'épicéas du Nord-Est de la France depuis 2018, dû à la prolifération des scolytes typographes.
- Les épicéas attaqués sont utilisables comme des épicéas sains mais leur coloration bleutée, provoquée par un champignon symbiotique du scolyte typographe, fait diminuer la valeur marchande du bois.

## 1.2 Le scolyte typographe (*Ips typographus*)

### 1.2.1 Biologie de l'espèce

Les scolytes typographes (*Ips typographus*) (figure 2) sont des coléoptères xylophages se nourrissant préférentiellement du bois de l'épicéa commun *Picea abies* (Nageleisen and Grégoire, 2022). Dans la suite de ce mémoire, les termes « scolytes » ou « typographes » seront utilisés pour désigner ces insectes. Tout leur cycle de vie, de la reproduction jusqu'à l'envol des jeunes adultes, se déroule sous l'écorce de cette essence.

Les typographes adultes passent l'hiver dans la litière des forêts ou sous l'écorce des arbres déjà colonisés. Au printemps, quand les températures augmentent, les adultes sortent de leur torpeur hivernale et s'envolent pour coloniser des arbres (Nageleisen and Grégoire, 2022). Cet événement est appelé l'essaimage de printemps. Lorsque qu'un individu se pose sur un hôte potentiel, et que les essais de forage sont concluants, il émet des phéromones d'agrégation, attirant d'autres individus sur l'arbre et ses voisins (Nageleisen and Grégoire, 2022). C'est le début de l'infestation.

Le mâle commence le forage de l'écorce en creusant la « chambre nuptiale », perpendiculairement au bois. Il est ensuite rejoint par deux ou trois femelles. Après accouplement, les

femelles vont creuser de nouvelles galeries à partir de la « chambre nuptiale », parallèlement aux fibres du bois. De part et d'autre de ces galeries, elles déposent des œufs dans de petites encoches. Les galeries maternelles peuvent contenir entre 20 et 80 œufs (Nageleisen and Grégoire, 2022). À l'éclosion, les larves se mettent, elles aussi, à creuser le bois perpendiculairement à la galerie maternelle, afin de s'en nourrir. Ces nombreuses galeries forment des motifs très caractéristiques dans l'écorce (figure 3).

Les larves vont ensuite passer par un stade de nymphe avant de se transformer en adulte immature. Le jeune adulte va alors finir sa croissance en se nourrissant également de l'écorce. À maturité, l'adulte va alors émerger de l'écorce et s'envoler pour coloniser un autre arbre et se reproduire. Ce vol est obligatoire et aléatoire. On estime que d'1 m<sup>3</sup> d'épicéa colonisé émerge environ 20 000 à 30 000 scolytes adultes (Nageleisen and Grégoire, 2022). À cela s'ajoute la capacité des adultes ayant déjà pondu à réémerger, c'est-à-dire à sortir de nouveau de l'écorce et à s'envoler, pour se reproduire une deuxième fois, donnant ainsi naissance à des générations « sœurs » (figure 4). À l'automne, lorsque les jours raccourcissent, les scolytes cessent leur activité de reproduction pour trouver un lieu où passer l'hiver, dans la litière ou sous l'écorce d'un arbre-hôte (figure 4).

La figure 4 schématise le cycle de vie des scolytes au cours d'une année, pour deux générations filles (G1 et G2). Le cercle vert et rouge superposé indique les symptômes observables sur l'arbre attaqué (traits rouges) au cours du développement des insectes. Nous aborderons plus en détail ces symptômes dans une prochaine partie (partie 1.2.2).

Il faut noter que la température est une variable essentielle dans le développement des scolytes. Avec des températures favorables, le développement dure entre 3 et 6 semaines et sur une saison (du printemps jusqu'au début de l'automne) jusqu'à 3 générations filles sont communément observées en plaine (Observatoire des forêts françaises, 2023b).

### Synthèse du 1.2.1

- Les scolytes typographes sont des coléoptères ravageurs de l'épicéa commun.
- La grande majorité de leur cycle de vie (reproduction et développement des juvéniles) se déroule dans des galeries creusées sous l'écorce d'un arbre-hôte.
- En plus des générations filles, des générations sœurs peuvent voir le jour, car les parents peuvent se reproduire une seconde fois dans un autre arbre-hôte.
- Jusqu'à 3 générations sont généralement observées en plaine.
- Leur développement est dépendant de la température, ce qui explique que les fortes chaleurs mènent à leur prolifération.



Figure 3: *Galleries creusées par le développement des scolytes dans l'écorce d'un épicéa (flèche rouge : galerie maternelle, flèche bleue : galerie d'un juvénile). Sources : (Nageleisen and Grégoire, 2022).*

(figure tirée de Nageleisen et al., *La santé des forêts*, 2010, CNPF-IDF)

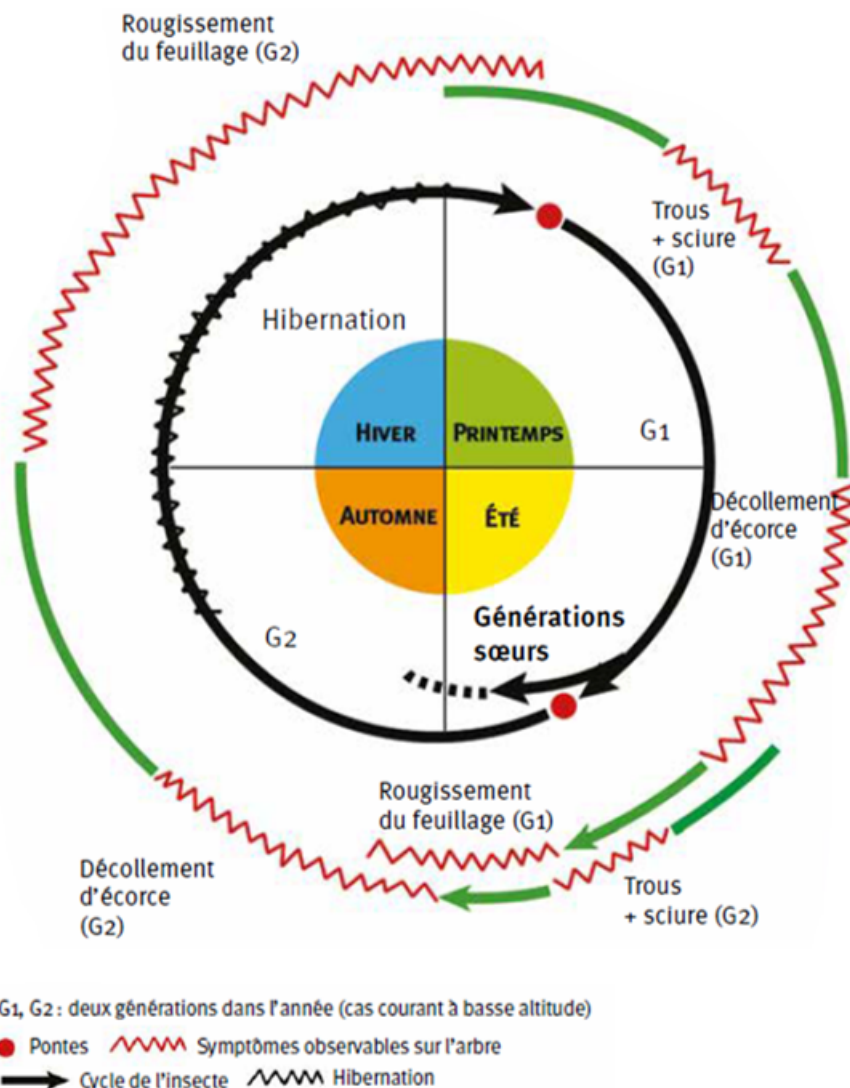


Figure 4: Cycle de vie des scolytes typographes (Nageleisen and Grégoire, 2022).

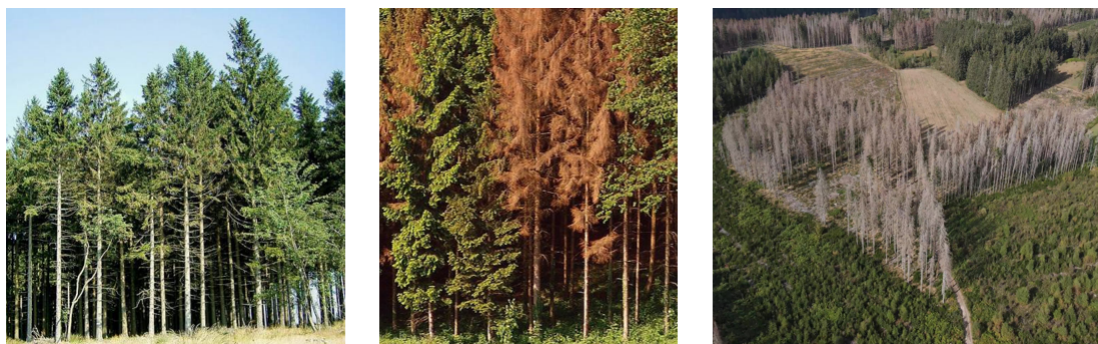


Figure 5: Photographies d'épicéas attaqués par des scolytes, de gauche à droite, au « stade vert » (Franck Vincentz), au « stade rouge » (WSL) et au « stade gris » (Alexandre Marchi)

## 1.2.2 Description des stades d'une attaque de typographes

Il est assez difficile d'arrêter une attaque de scolytes typographes car les signes de colonisation d'un arbre par les scolytes sont très peu visibles.

Sur le tronc, seuls de minuscules trous et un peu de sciure trahissent la présence des typographes (figure 4). En effet, ils ne creusent que dans la couche de l'écorce appelée liber, dans laquelle se situent les tissus conducteurs de sève élaborée (phloème) (Nageleisen and Grégoire, 2022). La sève élaborée est composée principalement de sucres produits par photosynthèse et nourrit les différentes parties de l'arbre, du haut vers le bas. Les tissus conducteurs de sève brute (xylème), sève composée d'eau et de nutriments et allant des racines à la cime, ne sont pas impactés. Les flux de sève et la teneur en eau sont donc modifiés (Dutrieux, Féret and Ose, 2021b) mais la cime est toujours alimentée et reste verte pendant toute la durée du développement des juvéniles. Les forestiers parlent de « stade vert » de l'infestation (Nageleisen and Grégoire, 2022).

Ce n'est que lorsqu'un champignon, vivant en symbiose avec les scolytes, commence à coloniser l'aubier, tissu dans lequel se trouve le xylème, que les effets de l'attaque vont commencer à se voir sur la cime (Nageleisen and Grégoire, 2022). Le manque d'eau va provoquer l'arrêt progressif de l'activité photosynthétique et les aiguilles vont alors prendre une teinte rouge/brune (« stade rouge ») puis grise (« stade gris ») (Nageleisen and Grégoire, 2022) jusqu'à la mort de l'arbre (figure 5). Les jeunes adultes typographes se sont alors déjà envolés vers d'autres arbres et il est trop tard pour endiguer la colonisation.

## 1.2.3 Moyens de lutte contre le typographe

Il existe peu de moyens de lutter contre les scolytes. La solution la plus efficace et économique est d'abattre au plus tôt les arbres infestés et de les écorcer, soit sur le lieu d'abattage, soit au lieu de dépôt. Dans tous les cas, il est essentiel de les déplacer d'au moins 5 km des massifs d'épicéas pour éviter la colonisation d'autres massifs (Département de la Santé des Forêts, 2018). En complément de l'écorçage, il est recommandé de laisser sécher à l'air libre l'écorce pour tuer les larves et les nymphes ou de les incinérer si les scolytes sont à un stade plus avancé (Département de la Santé des Forêts, 2018). Face à la difficulté d'endiguer la propagation des scolytes, la détection précoce est fondamentale dans la lutte contre ces ravageurs.



## Synthèse du 1.2.2 et 1.2.3

- Une attaque de scolytes est divisée en 3 stades, nommés selon la couleur des aiguilles de l'arbre :
  - le stade vert : les scolytes sont en développement dans l'arbre, mais les tissus conducteurs d'eau ne sont pas encore touchés et le flux atteint toujours la cime.
  - le stade rouge : les tissus conducteurs sont progressivement détruits par un champignon symbiotique des scolytes. Les jeunes scolytes ont déjà quitté l'arbre.
  - le stade gris : l'arbre est mort.
- Le stade vert est le stade pendant lequel il faudrait intervenir, mais la présence de scolytes est difficile à observer durant ce stade.
- Le moyen de lutte le plus efficace pour endiguer la prolifération est de couper les arbres infestés au plus vite et de les déplacer à au moins 5 km de tout épicéa.

### 1.3 FORDEAD, une chaîne de télédétection pour repérer les foyers de scolytes à un stade précoce

#### 1.3.1 Description de FORDEAD

Face à la nécessité de détecter au plus tôt les foyers de scolytes, des études sur l'utilisation de la télédétection ont été réalisées. C'est ainsi que la chaîne FORDEAD (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a) a été développée par l'UMR TETIS. Elle utilise les séries temporelles SENTINEL-2, c'est-à-dire une succession d'images satellitaires de la même zone, acquises à des dates différentes. Les deux satellites SENTINEL-2 ont une résolution spatiale de 10, 20 ou 60 m suivant les bandes (European Space Agency, 2024b) et un temps de revisite de 10 jours. En combinant les données des deux satellites, et en l'absence de nuage, il est donc possible d'obtenir des images à haute résolution spatiale tous les cinq jours.

Ces satellites permettent en particulier l'acquisition de données dans les domaines visible et infrarouge. Ces longueurs d'ondes sont très utiles pour obtenir des informations sur la végétation, notamment sur la teneur en eau, variable clef dans la détection précoce des scolytes (Dutrieux, Féret and Ose, 2021b). FORDEAD utilise donc un indice sensible à la teneur en eau de la végétation appelé CRSWiR (*Continuum removal in short-wave infrared*) et calculé à partir de la bande B11 (20 m de résolution). Il consiste à « maximiser le contraste spectral associé à des pics d'absorption », ici dans le moyen infrarouge, « en normalisant la valeur de réflectance par rapport à la valeur d'une 'enveloppe convexe' calculée à partir de bandes spectrales voisines » (figure 6) (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a). Plus la teneur en eau est faible, plus la valeur de CRSWiR est grande (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a).

L'indice est mesuré sur les forêts pouvant contenir des épicéas, identifiées avec la classification de la BDForet® de l'IGN (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a). Pour chaque pixel de l'image, le comportement du CRSWiR pour un état sain est caractérisé sur une période précédant la crise, et sa variation saisonnière est modélisée par une fonction harmonique (figure 7). À partir de 2018 (en dehors de la période de référence), si la valeur mesurée de l'indice s'écarte trop de la valeur prédite par le modèle, elle est considérée comme une anomalie (figure 7). Pour

éviter les faux positifs, comme lors d'un stress hydrique causé par une sécheresse courte, le pixel n'est catégorisé comme attaqué par des scolytes qu'à partir de trois anomalies successives (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a). De même, une sécheresse longue pouvant provoquer plusieurs anomalies à la suite, un retour à la normale est possible après trois dates successives classées sans anomalies (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a). FORDEAD produit en sortie des cartes d'anomalies liées à la présence de scolytes à une résolution de 10 m et qui permettent le suivi des foyers d'infestation par le DSF et l'IGN.

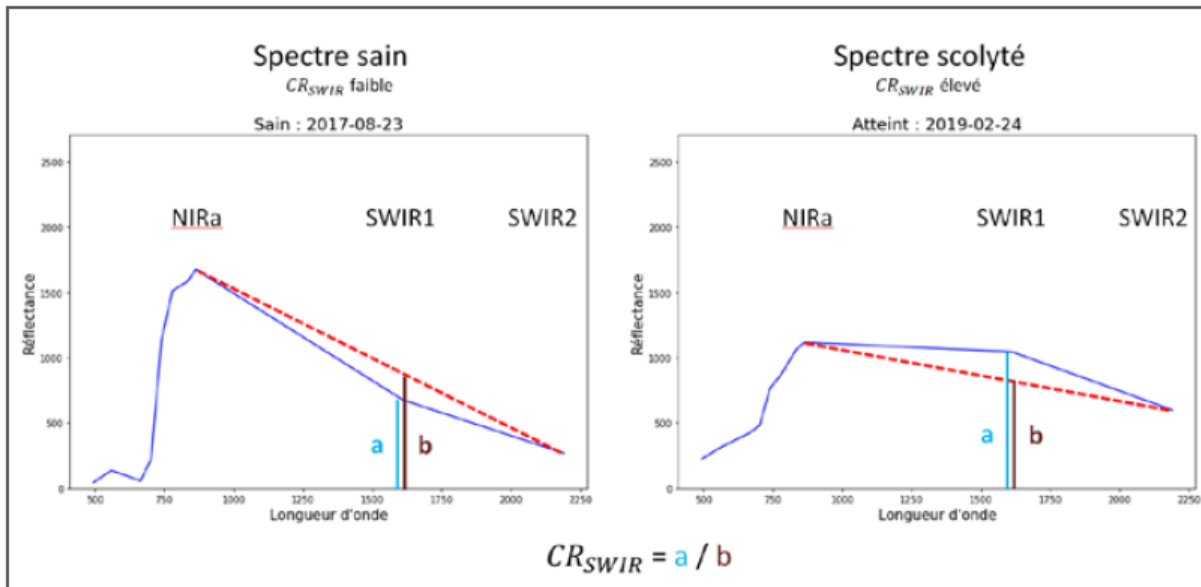


Figure 1. Illustration du calcul de l'indice  $CR_{SWiR}$  sur un profil spectral correspondant à un peuplement « sain » et un profil de peuplement « atteint ».

Figure 6: Illustration du calcul de l'indice  $CR_{SWiR}$  sur un profil spectral correspondant à un pixel « sain » (à gauche) et un profil de pixel « atteint » (à droite) (Source : Jean-Baptiste Féret, UMR TETIS).

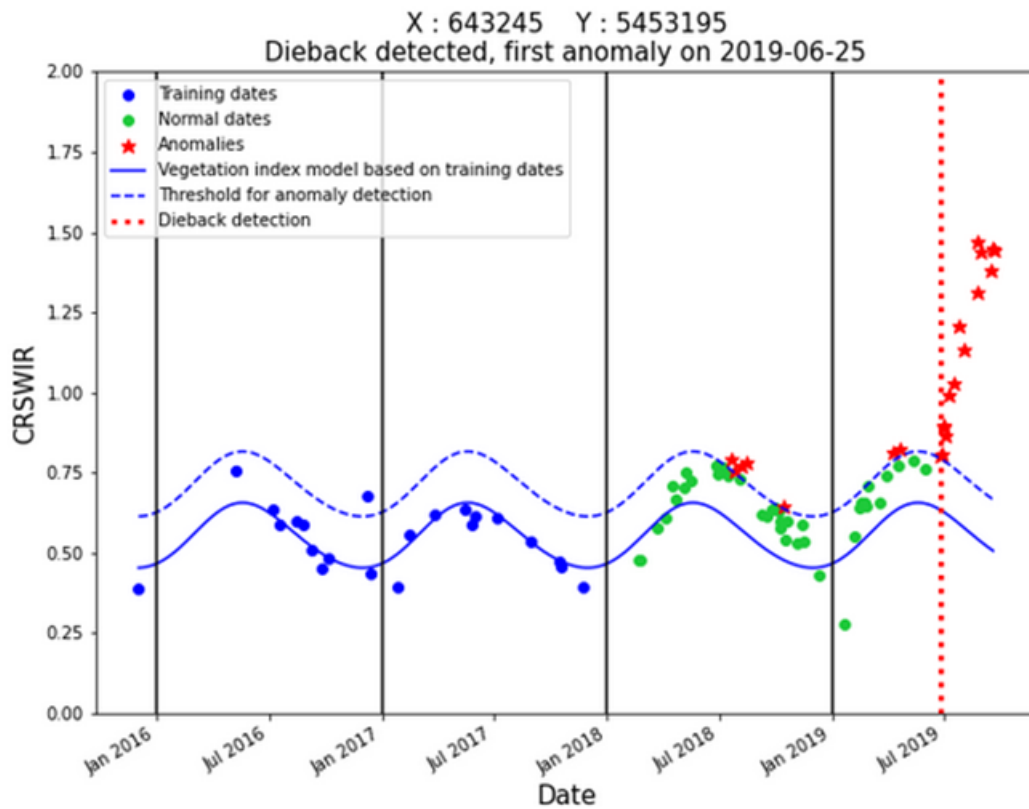
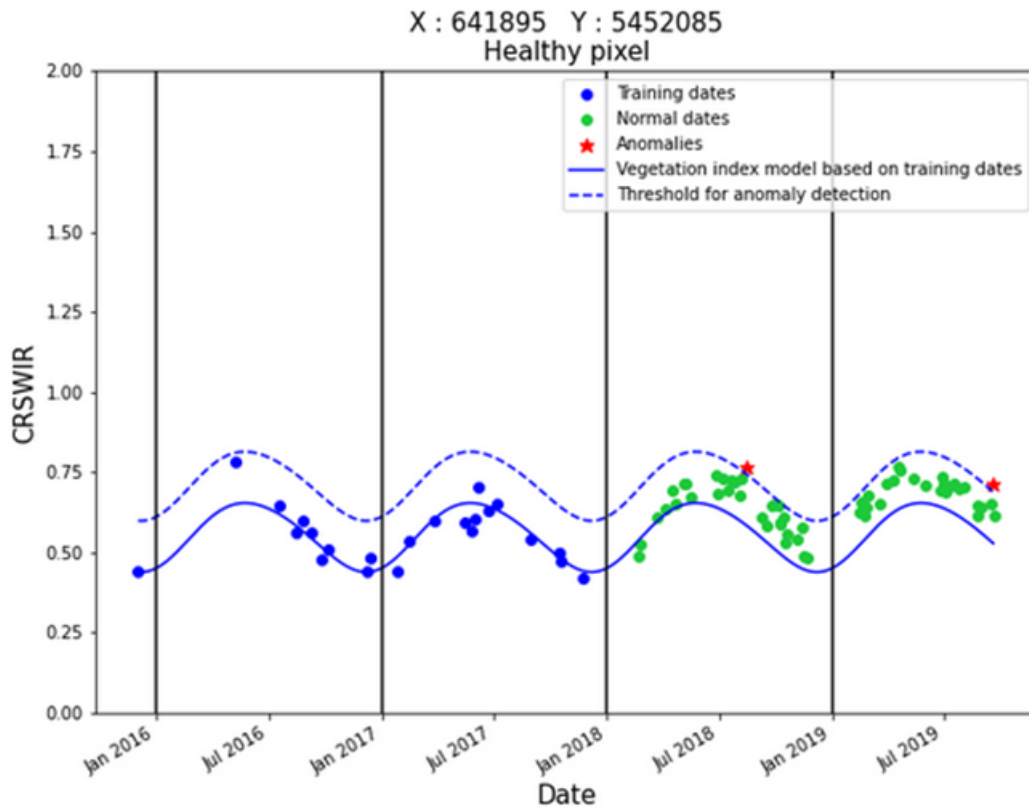


Figure 7: Valeurs du CRSWiR calculé par FORDEAD sur un pixel sain (en haut), et un pixel potentiellement attaqué par des scolytes (en bas) (Source : Jean-Baptiste Féret, UMR TETIS).

### 1.3.2 Limites de FORDEAD

Malgré son efficacité à cartographier le risque scolytes sur de grandes zones géographiques, la méthode présente des limites. La première est la fréquence à laquelle les images sont exploitables. En effet, si la couverture nuageuse (nébulosité) est trop importante, les images ne peuvent pas être analysées correctement. Dans certaines régions de France comme le Grand-Est, et selon les saisons et les années, la nébulosité peut modifier la fréquence d'images exploitables d'un délai de 5 jours à 1 mois, voire davantage. Il est donc possible de manquer l'apparition de nouveaux foyers, et de ne les repérer que trop tard. La seconde est l'interprétation des anomalies détectées. Malgré les précautions prises lors du classement des pixels en anomalie due à des scolytes, la méthode repose uniquement sur l'analyse d'images satellitaires. Il n'est donc pas forcément évident d'affirmer que ces anomalies sont effectivement provoquées par une attaque de scolytes et non par une sécheresse longue, ou une coupe d'arbres (chute brutale du couvert forestier).

L'utilisation de variables supplémentaires susceptibles d'influencer le cycle de développement des scolytes, comme la température, permettrait d'améliorer la confiance relative à une détection précoce. Ce type d'approche requiert le développement de modèles prédictifs de l'évolution des foyers d'infestation.

#### Synthèse du 1.3

- FORDEAD est une chaîne de télédétection permettant de repérer les foyers de scolytes au stade vert.
- La méthode se base sur la détection d'anomalies de flux hydrique dans la canopée grâce à l'indice CRSWiR.
- La méthode ne permet pas de différencier les anomalies liées à des attaques de scolytes de celles liées à une sécheresse.

## 1.4 L'utilisation de modèles pour prévoir le risque d'infestation par des scolytes

### 1.4.1 Présentation succincte de modèles d'études des scolytes

Une première approche de modélisation consiste à évaluer la vulnérabilité des arbres à l'aide de différentes variables comme des variables de peuplement (âge, densité d'épicéas, etc.), des variables spécifiques aux parcelles (réserve utile, type de sol, etc.) et des variables météorologiques pour estimer le risque d'infestation par des scolytes (Overbeck and Schmidt, 2012) (Groot and Ogris, 2019).

Une deuxième approche se fonde sur la phénologie des scolytes, c'est-à-dire sur la connaissance des événements périodique de leur cycle de vie, pour estimer les dates clefs de leur développement, comme la date d'essaimage de printemps, ou les dates d'émergence des générations filles. C'est le cas du modèle suisse Bostryche (Jakoby et al., 2016) (Institut fédéral de recherches sur la forêt la neige et le paysage WSL, 2016), et des modèles PHENIPS (Baier, Pennerstorfer and Schopf, 2007), et RITY-2 (Ogris et al., 2019), respectivement appliqués en Autriche et en Slovaquie.

Enfin, il existe également des modèles écosystémiques qui considèrent l'ensemble de l'écosystème, en combinant les deux approches précédentes : un modèle phénologique et un modèle de dynamique de populations des scolytes, associés à des modèles de dynamique forestière (Jönsson et al., 2012).

Les modèles phénologiques sont simples et nécessitent généralement peu de variables d'entrée ou de données terrains, ce qui facilite leur mise en place. C'est à ce type de modèle que nous nous intéresserons dans la suite de notre étude.

#### **1.4.2 RITY-2, un exemple de modèle phénologique de développement de *Ips typographus***

RITY-2 est un outil développé par le Slovenian Forestry Institute et le Department of Forestry and Renewable Forest Resources (Ogris et al., 2019). Il se base sur un modèle phénologique de développement d'*Ips typographus*. Ce modèle utilise la température maximale journalière pour calculer des sommes thermiques, sommes qui représentent la quantité de chaleur accumulée par les scolytes jour après jour. La température maximale (abréviation TX) est la température la plus élevée observée ou simulée au cours de la journée, entre 6 heures UTC (Universel Temps Coordonné) et le lendemain 6 heures. Elle se produit le plus souvent en cours d'après-midi. Chaque étape du développement des scolytes nécessitant une quantité de chaleur spécifique, il est possible d'estimer le stade de développement d'une génération à un temps donné grâce à ces sommes degrés.jours. En utilisant un modèle de prévision météorologique, il est aussi possible d'estimer le jour où les transitions entre les différents stades vont se produire et également le nombre de générations sur une saison. Utilisé en mode opérationnel, le modèle RITY-2 permet le suivi qualitatif de l'évolution du développement des populations de scolytes sur l'ensemble de la Slovénie. L'application génère des cartes, disponibles en ligne, représentant des variables clés, comme la date d'essaimage de printemps ou le nombre de générations filles attendues (figure 8). Ces cartes sont ensuite utilisées par les forestiers pour identifier les zones à surveiller et celles sur lesquelles intervenir.

##### Synthèse du 1.4

- De nombreuses approches par la modélisation (vulnérabilité des arbres, phénologie, dynamique de populations, etc.) permettent de prévoir le risque d'infestation par des scolytes.
- RITY-2 est un modèle phénologique de développement des scolytes qui utilise la température pour prévoir des variables clés, comme la date d'essaimage de printemps, et permet aux forestiers d'identifier les zones à risque.

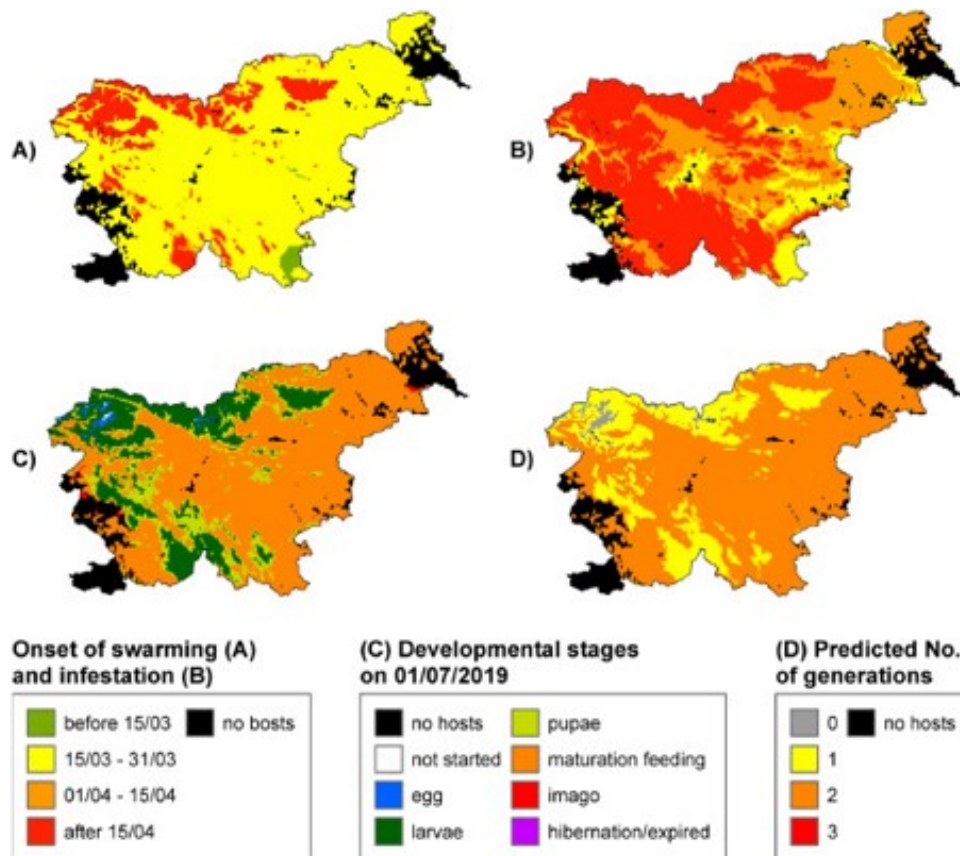


Figure 8: Cartes produites par RITY-2 sur toute la Slovénie en 2019 (Ogris et al., 2019)

## 1.5 Problématisation

Nous avons vu précédemment que l'outil de détection de foyer de scolytes FORDEAD manque de contextualisation pour lier les anomalies détectées à de réels foyers de scolytes. Les modèles phénologiques tel que RITY-2, quant à eux, ne se basent pas sur des observations et ne sont donc que des estimations de développement. Cependant, il pourrait être intéressant de coupler les deux approches. En effet, l'utilisation d'un modèle phénologique d'*Ips typographus*, pourrait permettre de confirmer ou d'infirmer que les anomalies détectées par la chaîne FORDEAD peuvent être effectivement liées à la présence de scolytes.

**Problématique :** la comparaison qualitative d'un modèle phénologique avec les sorties cartographiques d'un modèle de télédétection permet-elle de mieux contextualiser la détection des foyers de scolytes typographes dans la région Grand-Est ?

Cette étude a pour objectifs, d'une part, de créer des cartes qualitatives de prévision de développement des populations de scolytes sur la région Grand-Est, et d'autre part de comparer ces cartes à celles produites par la chaîne de traitement d'images satellitaires FORDEAD.

## **2 Matériels et méthodes**

Dans cette partie, nous détaillerons la méthode utilisée ainsi que les différents choix (données d'entrées, modèle, etc.) qui ont été fait pour concevoir notre modèle phénologique de développement des scolytes typographes. Tout d'abord, nous expliquerons le choix de la zone d'étude puis la méthode associée au modèle d'origine. Ensuite, le choix et l'acquisition des données d'entrées de notre modèle, ainsi que son implémentation seront développés. Enfin, nous décrirons les simulations et la représentation des résultats.

### **2.1 Zone d'étude**

#### **2.1.1 Choix de la zone d'étude : région Grand-Est**

L'étude est menée sur la région Grand-Est (figure 9 (en noir)). Cette région est la région historique de la crise « scolytes », sur laquelle l'épidémie a commencé en 2018. De plus, la production des sorties FORDEAD sur cette région est assurée par l'UMR TETIS.

#### **2.1.2 Choix de la zone de test : maille SENTINEL-2 32ULU**

Les acquisitions SENTINEL-2 sont divisées en mailles carrées de 110 km de côté (European Space Agency, 2024a). Quatorze mailles recouvrent la zone Grand-Est. Pour éviter de faire des essais sur une trop grande zone, la maille avec l'identifiant 32ULU a été choisie comme zone de test (figure 9 (en rouge)). Cette maille contient le parc naturel régional des Ballons des Vosges, dans lequel se trouve la plus grande proportion d'épicéas de la région.

#### **2.1.3 Restriction aux zones forestières : utilisation du masque Forêt FORDEAD**

Les scolytes typographes s'attaquant presque exclusivement aux épicéas communs, il est pertinent de restreindre les zones de simulation du modèle aux zones forestières abritant cette espèce. Ces zones ont déjà été sélectionnées pour les simulations de FORDEAD, et sont regroupées dans un masque forêt (figure 9 (en violet)) (Dutrieux, Féret and Ose, 2021a). Nous utiliserons ce masque pour les simulations de notre modèle.

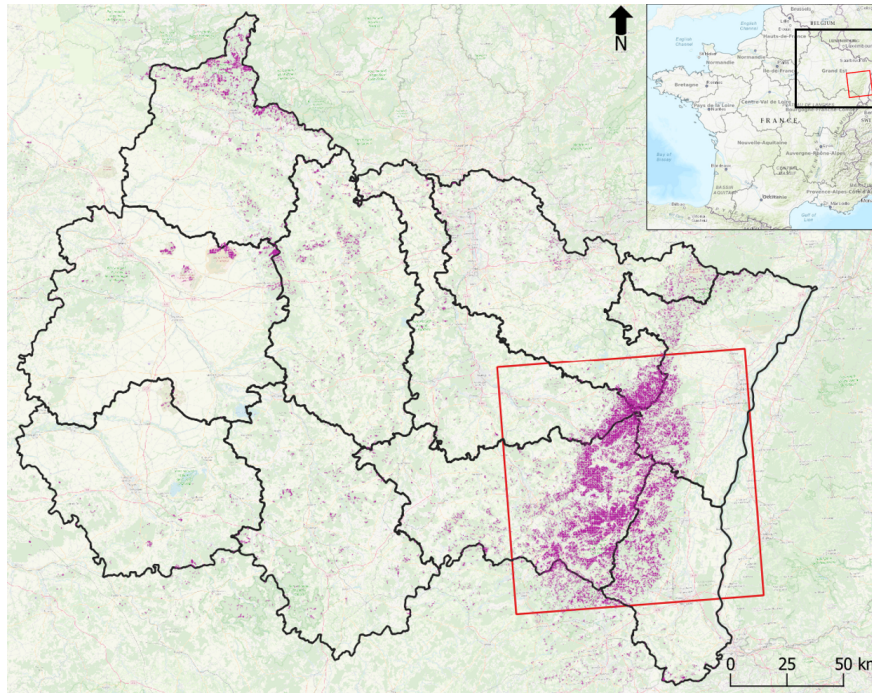


Figure 9: Zone d'étude (en noir, Région Grand Est) et zone de test (en rouge, tuile Sentinel-2 32ULU) avec superposition du masque forêt utilisée en entrée de la chaîne FORDEAD (en violet).

## 2.2 Le modèle phénologique de développement des scolytes utilisé

### 2.2.1 Choix du modèle phénologique de développement des scolytes

Trois modèles phénologiques de développement des scolytes ont été identifiés lors de la phase de recherche bibliographique :

- Bostryche (Jakoby et al., 2016) (Institut fédéral de recherches sur la forêt la neige et le paysage WSL, 2016) ;
- PHENIPS (Baier, Pennerstorfer and Schopf, 2007) ;
- RITY-2 (Ogris et al., 2019).

La méthode utilisée par Bostryche n'étant pas accessible, il n'est pas possible de la reproduire. En revanche, les méthodes de PHENIPS et RITY-2 sont décrites dans des articles scientifiques. Leurs méthodes sont similaires puisque RITY-2 est une version de PHENIPS adaptée au contexte géographique et météorologique de la Slovénie. Ces 2 modèles diffèrent néanmoins sur leurs variables d'entrées.

Pour PHENIPS, il est nécessaire de connaître la photopériode et le rayonnement solaire potentiel (Baier, Pennerstorfer and Schopf, 2007). Si la première est facilement accessible, la seconde l'est beaucoup moins. La variable de rayonnement permet de déduire la température à partir de la topographie des sites étudiés, de la latitude, du jour de l'année et de la saison (Baier, Pennerstorfer and Schopf, 2007). Elle est donc assez complexe à déterminer.



Pour RITY-2, seules la photopériode et la température journalière sont nécessaires (Ogris et al., 2019). RITY-2 étant le modèle phénologique le plus facilement reproductible, c'est sur lui que notre choix s'est porté.

## 2.2.2 Méthode utilisée par RITY-2, cas de la Slovénie (publication initiale)

RITY-2 permet de prédire des variables d'intérêt du développement du scolyte typographe, comme la date d'essaimage de printemps ou le nombre de générations fille qui se développeront durant la saison. Nous présentons ici les principales caractéristiques de ce modèle, tel que publié dans sa version initiale (Ogris et al., 2019).

**Variables en entrée :** la température journalière de l'air est récupérée à l'aide du système INCA (*Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis*) (Haiden et al., 2011). INCA est un système de « prévisions météorologiques immédiates intégrées grâce à une analyse globale » combinant des données mesurées en stations avec des données de télédétection comme la couverture nuageuse, de façon à reproduire les observations aux emplacements des stations. Ce système a été développé spécifiquement pour les zones montagneuses et possède une résolution spatiale de 1 km (Haiden et al., 2011).

**Calculs et seuils de température :** il est important de noter que tous les seuils de température utilisés par RITY-2 ont été déterminés ou confirmés par des observations de terrain. Le développement est simulé selon 3 scénarios, utilisant respectivement la température de l'air journalière maximale, moyenne, et minimale. La méthode étant la même pour les 3 scénarios, nous prendrons l'exemple du scénario utilisant la température maximale (Tmax). A partir de la température estimée par le système INCA, Tmax permet de calculer la température de l'air dans la forêt (AT). Ce calcul utilise une régression linéaire déterminée à partir de données terrain. La température de l'air de la forêt permet, de nouveau par régression linéaire, de déduire la température de l'écorce (BT). Comme indiqué précédemment, la température, en particulier celle de l'écorce, conditionne le développement des scolytes. Au dessous et au dessus de certaines températures seuils (respectivement, DTl = 8,3 °C et DTu = 38,9 °C (Wermelinger and Seifert, 1998)), la température est respectivement trop basse ou trop haute pour permettre l'activité et le développement des scolytes. Il existe également une température optimale de développement (To), fixée à 30,4 °C (Wermelinger and Seifert, 1998). La température du bois utilisée pour estimer le développement du stade oeuf au stade d'adulte mature, appelée température effective du bois (BTeff), dépend des seuils fixés précédemment. Ainsi, si la température est plus basse que DTl ou plus haute que DTu, la température effective du bois BTeff, est égale à 0. Entre le seuil bas de température DTl et la température optimale To, la température effective de l'écorce BTeff est calculée avec la fonction linéaire suivante :

$$BT_{eff} = BT - 8.3$$

Entre To et DTu, c'est une fonction non linéaire qui permet de déterminer BTeff (Wermelinger and Seifert, 1998) :

$$BT_{eff} = (To - DTl) \times (exp(\alpha \times BT) - exp(\alpha \times Tmax - (Tmax - BT)/\beta)) - \gamma$$

avec  $\alpha = 0.02876507$  ;  $\beta = 3.5922336$ ;  $\gamma = 1.24657367$ ;  $Tmax = 40.9958913$ .

Les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , et  $T_{max}$  ont été estimés de « façon itérative au moyen d'une analyse de régression non linéaire pour les températures proches des valeurs seuils et dans la plage des DTL et  $T_0$  » par Wermelinger and Seifert, 1998.

Sur le même principe, la température de l'air utilisée dans le calcul de la quantité de chaleur pour déterminer les dates d'essaimage de printemps et d'infestation est appelée température effective de l'air ( $T_{eff}$ ). Elle est calculée simplement en faisant la différence entre la température maximale journalière de l'air  $T_{max}$  et le seuil bas de température DTL :

$$T_{eff} = T_{max} - 8.3$$

Si  $T_{max}$  est inférieure au seuil DTL, alors la température effective de l'air est égale 0.

**Essaimage de printemps et début de l'infestation :** le début de calcul du modèle a été fixé au 7 mars, date de début de saison (figure 10). Cette date a été déterminée en se basant sur la date d'essaimage la plus précoce observée sur la zone de Slovénie étudiée (Ogris et al., 2019). En début de saison, c'est la somme thermique de l'air qui est utilisée puisqu'elle conditionne l'essaimage de printemps des scolytes et le début de l'infestation. Ainsi, la quantité de chaleur nécessaire à l'essaimage de printemps est 53,0 degré-jours (dj) (Ogris et al., 2019). Quand la somme thermique de l'air atteint ou dépasse cette valeur et si la condition de vol est vérifiée, c'est-à-dire que la température maximale journalière de l'air est supérieure ou égale à 14,5 °C (Ogris et al., 2019), alors les scolytes peuvent sortir de leur lieu d'hibernation et s'envoler. L'infestation des arbres-hôtes commence à partir de 155,6 dj (Ogris et al., 2019). C'est à la date du début de l'infestation que le développement de la première génération fille va commencer (figure 10).

**Développement des générations de scolytes :** pour le développement des générations filles et sœurs, c'est la somme thermique des températures de l'écorce qui est utilisée. Le développement total, du stade oeuf au stade adulte mature, requiert une somme thermique de 557 dj (Baier, Pennerstorfer and Schopf, 2007). Chacun des stades du développement nécessite une certaine quantité de chaleur. Les stades oeuf, larve, nymphe et la maturation jusqu'à l'adulte capable de se reproduire nécessitent respectivement 9,3 % , 37,0 % , 10,4 % , et 43,3 % (Wermelinger and Seifert, 1998) de la quantité de chaleur totale nécessaire au développement.

Une fois adulte et mature, si les conditions de vol ( $T_{max} \geq 14,5$  °C) et de photopériode minimale à la reproduction, c'est-à-dire une photopériode supérieure ou égale à 14,5 h (Ogris et al., 2019), sont vérifiées, alors la génération fille peut émerger pour aller coloniser de nouveaux arbres et donner naissance à la deuxième génération fille (figure 10).

A la moitié du développement de la génération fille, soit une somme thermique de 278,5 dj (Baier, Pennerstorfer and Schopf, 2007), la génération parentale peut, si les conditions de vol et de photopériode sont vérifiées, s'envoler pour aller se reproduire une seconde fois et donner naissance à une génération sœur (phénomène de réémergence) (figure 10). Cette génération sœur se développera de la même façon que la génération fille avec deux différences notables. La première est que la génération parentale ne s'envolera plus pour aller se reproduire. La seconde est que, dans un souci de simplification du modèle RITY-2, les générations sœurs sont considérées comme stériles dans le modèle, et ne donneront donc pas naissance à une nouvelle génération.

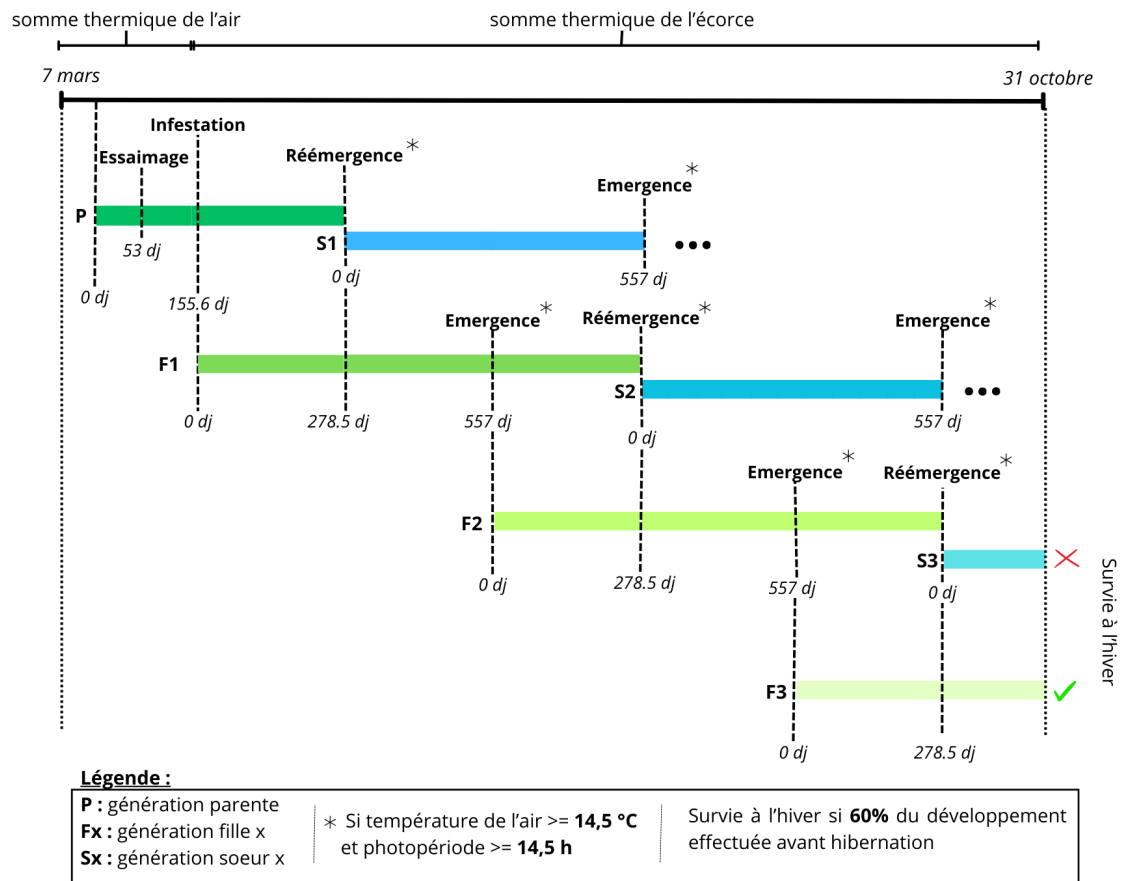


Figure 10: Développement d'une population de scolytes sur une saison selon le modèle phénologique RITY-2

**Fin de la saison :** les générations filles et sœurs vont se succéder jusqu'à ce que la photopériode soit inférieure à la photopériode minimale nécessaire à la reproduction (Figure 10). L'activité de reproduction va alors cesser et aucune nouvelle génération ne se développera après cette date (Ogris et al., 2019). Les générations filles et sœurs encore en développement vont continuer à se développer jusqu'au 31 octobre (figure 10). Passée cette date, les observations sur les zones étudiées montrent que le développement a déjà cessé depuis plusieurs jours (Ogris et al., 2019). Si les scolytes n'ont pas au moins atteint 60 % de la somme thermique nécessaire au développement total, soit le stade d'adulte immature, elles ne pourront pas survivre à l'hiver (Ogris et al., 2019). Dans le cas contraire, elles pourront hiberner et finir leur développement l'année suivante (figure 10).

**Sorties du modèle :** en sortie, RITY-2 produit des cartes de prédiction (à l'échelle de la Slovénie) de la date d'essaimage de printemps et du nombre de générations filles et sœurs attendues pour la saison (figure 8). Le modèle prédit les dates clés de développement 7 jours en avance (Ogris et al., 2019) permettant ainsi la pose de piège.

**Freins techniques de RITY-2 :** bien que la méthode et les codes de RITY-2 soient accessibles, il est développé en Visual Basic, un langage de programmation principalement utilisé dans l'environnement Microsoft (non open source), et considéré comme moins polyvalent que

d'autres langages plus modernes associés à l'écosystème de la science des données (R, Python, etc.). Il sera donc intéressant pour cette étude et la communauté scientifique de le coder dans un autre langage.

### Synthèse du 2.2.2

- RITY-2 se base sur le calcul de différentes sommes thermiques pour prédire les variables d'intérêt du développement des scolytes (date d'essaimage, nombre de générations attendues).
- Les dates d'essaimage de printemps et du début de l'infestation sont estimées à partir de la température de l'air de la forêt.
- Le développement des générations filles et sœurs et leurs dates d'émergence sont estimées à partir de la température de l'écorce.
- Le développement du stade oeuf au stade adulte mature dure 557 dj.
- En fin de saison, les générations filles et sœurs ayant atteint le stade d'adulte immature sont susceptibles de survivre à l'hiver.
- RITY-2 permet la production de cartes de prédiction des variables d'intérêt sur toute la Slovénie avec 7 jours d'avance.

## 2.3 Données d'entrée du modèle phénologique du scolyte typographe :

Le développement des scolytes est principalement lié à deux variables : la température maximale journalière et la photopériode.

**Acquisition des données de photopériode :** la photopériode correspond à la durée quotidienne du jour, elle change en fonction de la saison et de la localisation sur le globe terrestre. En dessous d'un certain seuil de photopériode (14,5 h (Ogris et al., 2019)), les scolytes stoppent leur activité de reproduction et cherchent un lieu pour passer l'hiver. La photopériode ne change quasiment pas d'une année sur l'autre pour un même jour, il n'est donc pas nécessaire de l'acquérir quotidiennement. Elle est stockée « en dur » dans le code.

**Acquisition des données de température maximale journalière :** la seconde variable d'entrée est la température maximale journalière. Cette donnée essentielle pour le modèle doit être lue et stockée quotidiennement. Les données du système INCA, utilisé par RITY-2, ne sont pas produites et/ou accessibles sur la France hexagonale. Nous avons donc opté pour un autre modèle de prévision météorologique. Plusieurs critères entrent dans le choix du produit à utiliser. Tout d'abord, sa résolution doit se rapprocher le plus possible de celle des sorties FORDEAD, soit 10 m. Ensuite, il doit donner accès à la température maximale à un pas de temps journalier, ou à défaut, à des données permettant de calculer la température maximale. Si possible, le produit doit également proposer des prévisions pour les jours suivants. Enfin, il est intéressant de disposer d'archives pour retracer la crise « scolytes » depuis ses débuts en France : tempêtes en 2017, sécheresses et canicules exceptionnelles des années 2018, 2019, 2020 et 2022.

**Choix du modèle météorologique prévisionnel :** depuis 2024, Météo-France propose une large partie de ses données et résultats de modèles en *open data*, librement et gratuitement. Il est ainsi possible d'accéder aux sorties de différents modèles prévisionnels : AROME et ARPEGE (Météo France, 2024) :

- **AROME** est le modèle prévisionnel opérationnel météorologique de Météo-France. Ce modèle prévoit notamment la température à un pas de temps horaire, avec une résolution spatiale de  $0,01^\circ$  soit environ 1,3 km (Météo France, 2024). Les valeurs prédites vont jusqu'à 51 h après l'heure de prévision (soit 2 jours et 3 h) (Météo France, 2024) ;
- **ARPEGE** prévoit également la température, toutes les 6h et avec une résolution spatiale de 5 km (Météo France, 2024). Il permet de prédire des valeurs jusqu'à 4 jours après l'heure de prévision (Météo France, 2024).

Ni AROME ni ARPEGE ne fournissent la température maximale journalière directement. Cependant, le pas de temps horaire proposé par AROME permettrait d'estimer la température maximale journalière. De plus, AROME a la résolution spatiale la plus fine. Il a donc été décidé d'utiliser le modèle AROME.

**Des archives de données de températures pour retracer le début de la crise :** AROME ne possède pas d'archives permettant de retracer la crise « scolytes ». Néanmoins, Météo-France possède d'autres produits non encore référencés en libre accès, comme ANASTASIA. Ce produit contient les données de température maximale et minimale journalière depuis 1947 sur l'ensemble de la France hexagonale (Van-Hyfte, 2024). La température maximale est estimée par une technique de krigeage (méthode d'interpolation permettant de prédire la valeurs d'un point à partir de la valeur d'autres points) en fonction de l'altitude à partir des mesures des stations météo (Van-Hyfte, 2024). Sa résolution spatiale est de 1 km (Van-Hyfte, 2024), proche de celle du modèle AROME. Ce produit pourra donc être utilisé pour faire tourner le modèle depuis le début de la crise.

**Association avec les données des stations météo :** en complément des prévisions d'AROME, et dans le but de vérifier leur cohérence avec les observations, les Tmax mesurées aux stations météo de la zone d'étude ont été utilisées.

**Méthode d'acquisition des données de Tmax :** les températures prédites par AROME sont récupérées tous les jours via l'API « AROME  $0,01^\circ$  » sur les zones de test et d'étude. Les fichiers étant en format grib2, format binaire courant en météorologie et climatologie, la bibliothèque python *pygrib* a été utilisée pour manipuler ces données. La température maximale d'un jour donné est définie météorologiquement comme la température maximale entre 06h le jour J et 06h le lendemain (Van-Hyfte, 2024). La température maximale intervient le plus couramment entre 12h et 18h le jour J (Van-Hyfte, 2024). Ainsi, afin d'alléger l'extraction et l'exploitation des données, il a été choisi de ne télécharger que les températures entre 12 h et 18 h pour chaque point AROME des zones définies. Puis, la valeur maximale de ces 7 heures est associée à la température maximale du jour (Tmax).

## Synthèse du 2.3

- La température maximale journalière de l'air est acquise via l'API AROME de Météo-France pour 2024 ou via les archives d'ANASTASIA pour les années précédentes.

## 2.4 De RITY-2 à RITYPY : développement d'une version *open-source* du modèle phénologique

### 2.4.1 Choix du langage de programmation

Dans l'esprit de la science ouverte, l'objectif est de créer un modèle qui soit facilement compréhensible et repris par une autre personne. Dans la communauté scientifique, deux langages de programmation sont majoritairement utilisés : R et Python. La chaîne FORDEAD a été développée en Python, et afin de faciliter le lien entre FORDEAD et le modèle à développer, il a été décidé d'utiliser ce langage pour développer notre modèle.

### 2.4.2 Implémentation de RITYPY, une version Python de RITY-2

Notre modèle simule le développement des générations de scolytes sur une année à l'aide de la température de l'air journalière. Il se base sur la méthode de RITY-2 expliquée précédemment (voir section 2.2, page 15). Notre modèle étant la version python de RITY-2, il a été décidé de le nommer RITYPY.

Contrairement à RITY-2, aucune date de début de saison n'a été prise, il a été considéré que le calcul de la somme thermique de l'air pouvait débuter dès que la température dépasse le seuil fixé. De même pour la date de fin de saison, après la date de fin de reproduction, le développement des dernières générations filles et sœurs peut continuer tant que la température le permet, ce qui peut varier d'une année à l'autre. Une saison s'étend donc du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre.

Pour chaque point de température mesurée, nous effectuons l'acquisition des températures à un pas quotidien afin de prédire les différents stades phénologiques. Pour simplifier la compréhension de l'algorithme, son explication a été découpé en 3 parties et est accompagnée d'un schéma (figure 11) :

- **L'essaimage de printemps et le début de l'infestation :**
  - la température de l'air de la forêt est calculée à l'aide de la fonction *f\_temperature* qui permet de calculer une température à partir d'une température mesurée et des deux coefficients d'une régression linéaire ;
  - La température effective est ensuite calculée (*f\_T\_eff\_air*) puis est ajoutée à la somme thermique de l'air de la forêt (*f\_therm\_sum*) ;
  - la fonction *f\_date\_swarming* vérifie si la somme thermique de l'air de la forêt a atteint la valeur nécessaire à l'essaimage de printemps. Si c'est le cas et que la température maximale de l'air du jour permet le vol des scolytes, alors l'essaimage a lieu. Si l'essaimage a déjà eu lieu, la fonction *f\_date\_infestation* vérifie si la somme thermique de l'air de la forêt a atteint la valeur nécessaire au début de l'infestation ;
  - Si l'infestation se produit ou si elle s'est déjà produite, l'algorithme va alors exécuter les fonctions liées au développement des générations filles et sœurs.

- **Le développement des générations de scolytes :**

- la température de l'écorce est calculée à partir de la température de l'air de la forêt avec la fonction *f\_temperature*, citée précédemment ;
- la température effective de l'écorce va être calculée, comme indiqué dans la partie 2.2.1, à l'aide de la fonction *f\_T\_eff\_bark* ;
- le temps de développement des générations filles et sœurs est alors simulé par la fonction *f\_dev\_daughters*. Pour chaque génération fille en cours de développement :
  - \* la somme thermique de la température de l'écorce associée à la génération considérée est calculée (*f\_therm\_sum*) ;
  - \* le stade de développement est mis à jour (*f\_dev\_stage*) ;
- les conditions de réémergence de la génération parentale sont ensuite vérifiées avec le test de la fonction *f\_date\_emergence* :
  - \* si la somme thermique a atteint 278,5 dj, alors la réémergence a lieu. Si c'est le cas, ou qu'elle s'est déjà produite, que la photopériode n'a pas atteint le minimum provoquant l'arrêt de l'activité de reproduction et que la température de l'air permet le vol, alors une nouvelle génération sœur est initialisée, et son développement est calculé (*f\_dev\_sisters*) ;
  - \* si la génération sœur avait déjà débuté, le modèle calcule simplement son développement avec la fonction *f\_dev\_sisters*. Cette fonction reprend trois étapes de la fonction *f\_dev\_daughters* : l'incrémentation de la somme thermique pour la génération sœur considérée, la mise à jour de son stade de développement et la vérification de son émergence, expliquée dans le paragraphe suivant.
- Une fois estimée le développement de la génération sœur potentielle, ce sont les conditions d'émergence de la génération fille qui sont ensuite vérifiées (*f\_date\_emergence*), à savoir si la somme thermique a atteint 557 dj. Si c'est le cas, alors l'émergence a lieu. Si l'émergence a lieu (ou qu'elle s'est déjà produite mais que la reproduction n'a pas pu avoir lieu), que les conditions de température et de photopériode sont remplies, alors une nouvelle génération fille est initialisée.

- **La fin de saison :** une fois que cet ensemble de fonction a été exécuté, le modèle vérifie si le développement des dernières générations filles et sœurs permet leur survie à l'hiver (*f\_survival*).

L'ensemble de ces étapes est répété quotidiennement pour chaque point de la zone considérée (figure 11).

Les codes du modèles sont accessibles sur le GitLab de l'UMR TETIS à l'adresse suivante : <https://forgemia.inra.fr/umr-tetis/ritypy> (Colombet, 2024).

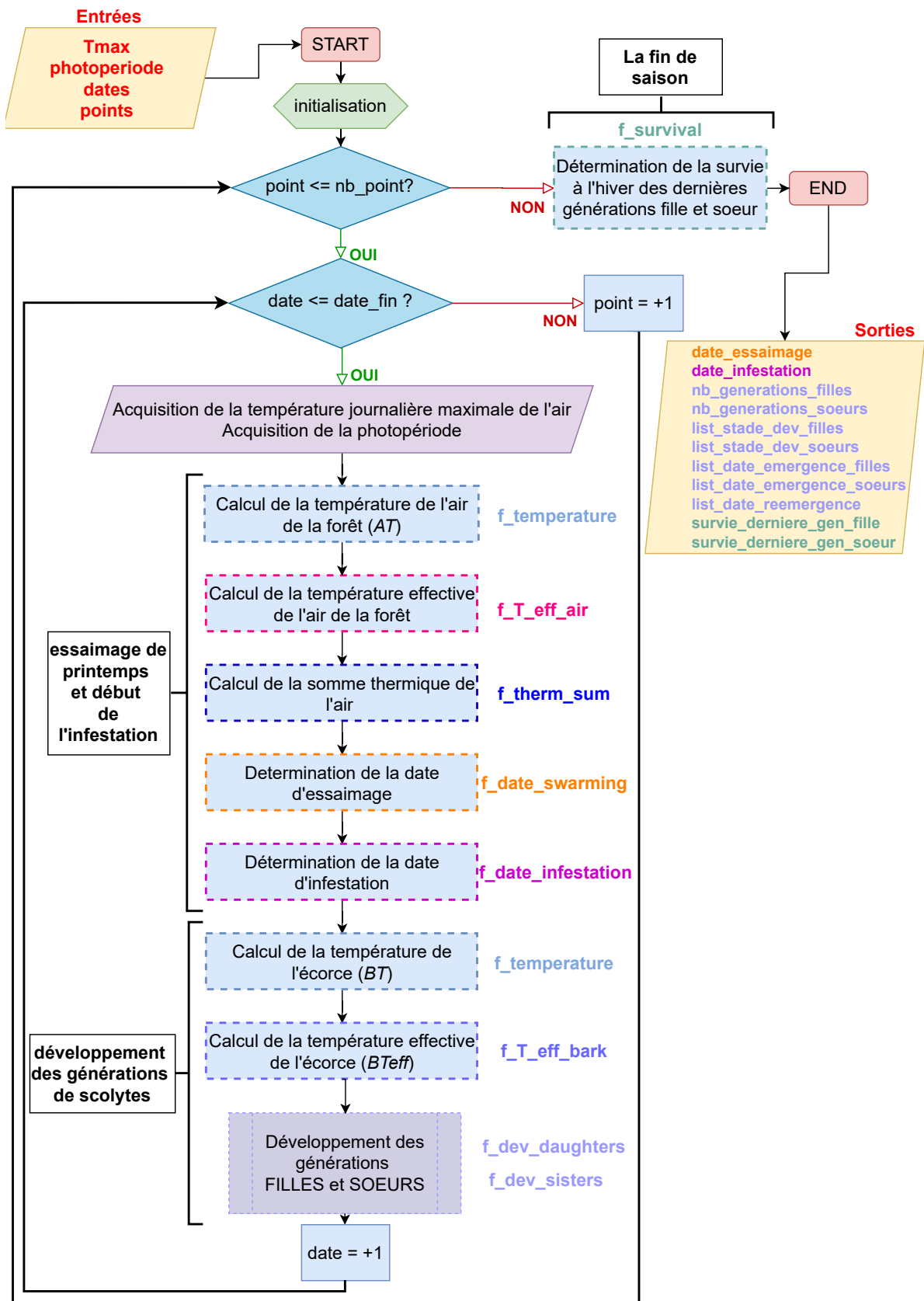


Figure 11: Logigramme simplifié de l'algorithme du modèle RITYPY



## Synthèse du 2.4

- L'algorithme de RITYPY est décomposé en fonctions pouvant être regroupées en 3 parties :
  - L'essaimage de printemps et le début de l'infestation : ces deux dates sont calculées à partir de la température effective de l'air de la forêt.
  - Le développement des générations : les stades de développement des générations filles et sœurs ainsi que leur dates d'émergences sont calculées à partir de la température effective du bois. C'est aussi dans cette partie qu'est calculée la date de réémergence des parents.
  - La fin de saison : les conditions de survies des dernières générations filles et sœurs sont vérifiées.
- Ces étapes sont répétées tous les jours pour chaque point AROME ou ANASTASIA de la zone d'étude.

## 2.5 Simulations et sorties du modèle RITYPY

### 2.5.1 Simulations quotidiennes

Les données météorologiques AROME n'ayant pas d'archives accessibles, il n'a pas été possible de simuler le développement des scolytes sur l'année 2024. La récupération des données ayant débuté le 2 juin, les simulations commencent également à cette date. Or, certains événements comme l'essaimage de printemps et l'émergence des premières générations filles et sœurs se sont déjà certainement produits (figure 1). Les prévisions sur les données récupérées seront donc forcément erronées. Dans le cadre de ce stage, ces données servent de preuve de concept pour envisager un modèle opérationnel sur les années suivantes.

Dans notre étude, les données météorologiques ANASTASIA permettent de constituer une base de données de températures journalières maximales à un pas de temps journalier, de 2014 jusqu'à 2023. Les simulations de RITYPY peuvent donc être effectuées sur une année entière, du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre, ce qui permet de suivre l'évolution de la population de scolytes sur une saison entière. Les simulations ont été effectuées pour l'année 2023. Celles de 2018, année de début de la crise, à 2022 sont en cours.

Les données ANASTASIA étant des valeurs discrètes, il a été nécessaire de les rendre continues afin d'avoir des valeurs pour chaque partie du masque forêt des zones étudiées. Chaque point a donc été transformé en maille carrée de 1 km de côté, en prenant le point comme centroïde de la maille. La température est considérée comme homogène à l'intérieur de chaque maille. Cette grille a ensuite été superposée au masque forêt afin de sélectionner toutes les mailles en recouvrant une partie. Les simulations ont ensuite été effectuées sur les centroïdes des mailles sélectionnées.

### 2.5.2 Sorties cartographiques : cartes des variables phénologiques du scolyte typographe

Comme précédemment, les points ANASTASIA sur lesquels a été exécuté RITYPY ont été transformés en mailles. La grille ainsi produite a été de nouveau superposée au masque forêt

afin d'effectuer une opération de découpe et de récupérer les valeurs uniquement aux endroits couverts par le masque forêt. Les polygones du masque forêt peuvent être couverts par plusieurs mailles, ils sont donc découpés en sous-polygones. Il en résulte une couche géographique parfaitement superposable au masque forêt mais avec les valeurs de sorties du modèle pour chaque sous-polygone. Les cartes ont ensuite été réalisées à l'aide de la librairie Python Matplotlib.

### Synthèse du 2.5

- Les simulations de RITYPY ont été effectuées sur les données de températures ANASTASIA de l'année 2023.
- Les données ponctuelles de températures ont été transformées en maille pour obtenir des données spatialement continues sur le masque forêt de la zone étudiée.
- Cette continuité résulte en la création de sous-polygones dans le masque forêt.

## 2.6 Méthode de comparaison qualitative des sorties de RITYPY et de FORDEAD

Pour prendre en compte la disponibilité simultanée des différents jeux de données (sortie de la chaîne de télédétection FORDEAD et données de température de l'air), la comparaison entre les sorties des deux modèles a été réalisée sur l'année 2023. Les données des années précédentes (2018 à 2022) seront comparées prochainement.

Les anomalies détectées par FORDEAD sont disponibles sous la forme de synthèses mensuelles en format *Shapefile* (fichier géographique), ou pour chaque image SENTINEL-2 exploitable en format raster. Chaque anomalie FORDEAD est associée au sous-polygone du masque forêt la contenant. La méthode appliquée ensuite étant la même pour chaque sous-polygone, nous ne la détaillerons que pour un seul :

- les surfaces des différentes anomalies sont calculées, puis additionnées afin d'avoir une surface d'anomalies totale sur le sous-polygone ;
- ces étapes sont reproduites pour tous les mois de 2023 pour lesquels la chaîne FORDEAD présente des données de sortie ;
- la somme cumulée des surfaces d'anomalies est calculée afin de rendre compte de l'augmentation ou non des anomalies mois après mois sur le sous-polygone ;
- cette augmentation est ensuite représentée sous forme de graphique en escalier, avec les mois en abscisses et la surface en m<sup>2</sup> en ordonnée. Ce graphique est alors superposé à la frise chronologique de développement de la population de scolyte simulé par RITYPY pour ce sous-polygone (figure 12).

Cette superposition doit permettre de comparer qualitativement l'évolution des surfaces d'anomalies avec les stades de développement des différentes générations de scolytes, en montrant par exemple un lien entre les dates d'émergences et les dates d'augmentation des anomalies.

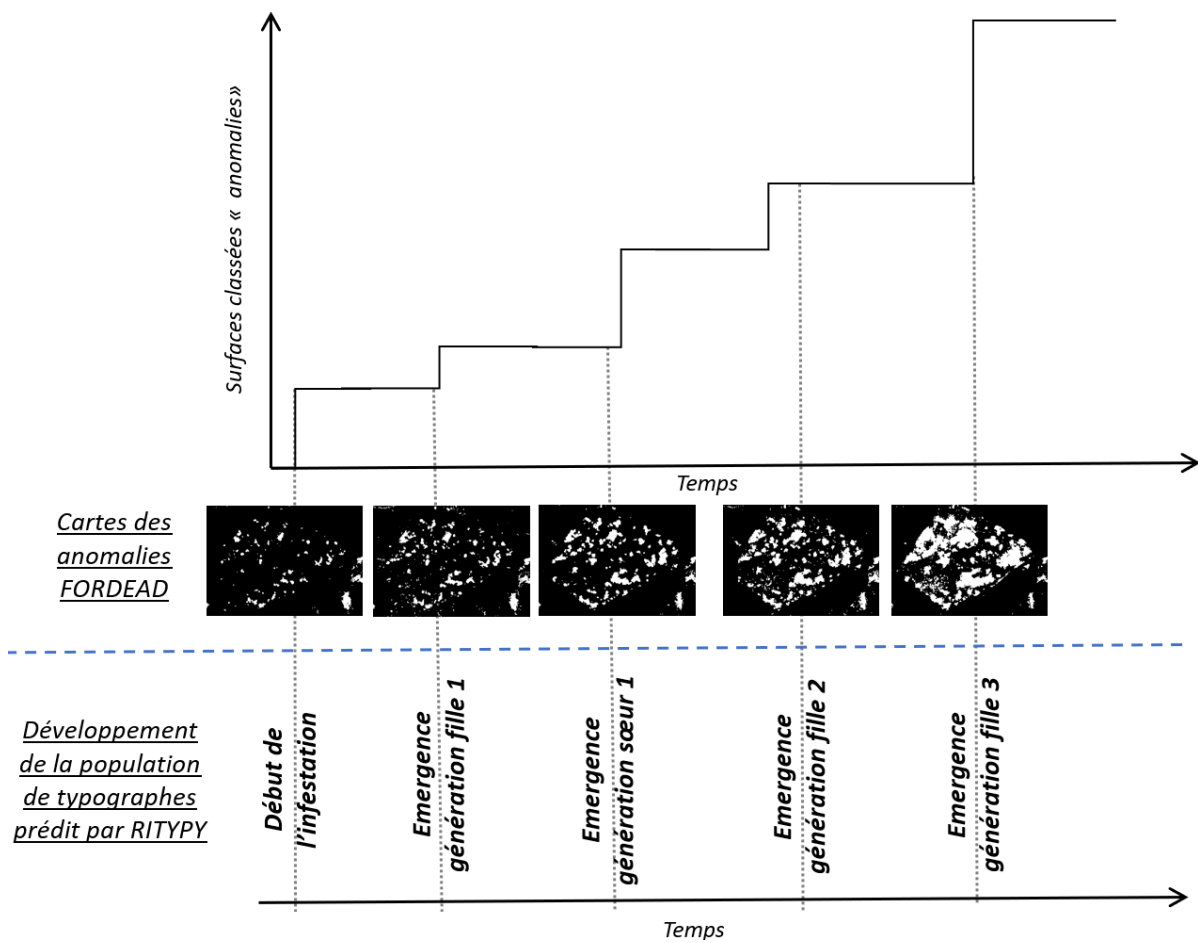


Figure 12: Exemple de comparaison superposant un graphique en escalier représentant l'évolution des surfaces classées en anomalies par FORDEAD et une frise chronologique représentant le développement des scolytes selon RITYPY

## 3 Résultats

### 3.1 Cartes des variables phénologiques du typographe sur les forêts du Grand-Est

Les cartes présentées dans cette partie ont été réalisées avec les données ANASTASIA.

La figure 13-A représente **la carte des dates d'essaimage de printemps de l'année 2023 sur la maille 32ULU**. Les dates d'essaimage sont représentées par un dégradé de couleurs allant du jaune-kaki pour les dates les plus précoces au marron pour les dates les plus tardives. Cette carte montre que les dates d'essaimage s'étalent du 14 février au 4 mai et semblent avoir un lien avec l'altitude (figure 14). En effet, les dates d'essaimage les plus précoces sont observées en plaine (les zones les plus à l'extérieur) et les plus tardives sur les zones plus élevées (au centre). Ce résultat semble cohérent avec la biologie de l'insecte et la connaissance de l'espèce. Le développement des scolytes étant dépendant de la température, la quantité de chaleur qu'il doivent emmagasiner pour se développer est plus longue à atteindre dans les zones situées vers les sommets, qui sont plus froides.

Nous pouvons constater que la grande majorité des scolytes semble émerger durant la 2<sup>ème</sup> moitié du mois de mars de cette année 2023. On observe également que les scolytes sont susceptibles d'émerger dès la mi-février dans les zones de plaines, ce qui est plus tôt que ce que prévoit le modèle de base RITY-2, puisque les simulations commencent le 7 mars. Cela peut s'expliquer par une différence géographique, RITY-2 ayant été conçu pour la Slovénie.

Concernant la figure 13-B, elle représente **le nombre de générations filles prédites sur la maille 32ULU en 2023**. Le nombre de génération est représenté par un dégradé de couleur allant du jaune pour 1 génération en développement ou déjà développée, au rouge sombre pour 7 générations. Seules les valeurs présentes sur la carte s'affichent dans la légende, c'est pourquoi la légende de la figure 13-B s'arrête au chiffre 4. Une absence de génération (c'est-à-dire 0) est symbolisée par du gris.

Cette carte montre qu'entre deux et trois générations filles sont prédites sur la plupart des zones, jusqu'à 4 dans quelques-unes. De nouveau, une cohérence avec l'altitude est observée, puisque moins de générations sont prédites sur les zones élevées.

Les sorties mensuelles du 1er janvier au 31 décembre permettraient de suivre l'évolution du nombre de générations filles au cours du temps. Les cartes sont encore en cours de production pour la plupart mais nous pouvons supposer que l'augmentation la plus rapide dans le nombre de générations filles sera pendant les mois plus chauds, généralement juillet et août.

La figure 13-C, quant à elle, est la **carte du le nombre de générations sœurs prédites sur la maille 32ULU en 2023**. Le code couleur est le même que pour la figure 13-B. La cohérence avec l'altitude est encore plus visible que pour la figure 13-B puisque les zones les plus élevées ne voient qu'une seule génération se développer alors que les zones de basse altitude en voient 3.

Une comparaison avec des données terrains seraient intéressantes pour évaluer la qualité des résultats de RITYPY.

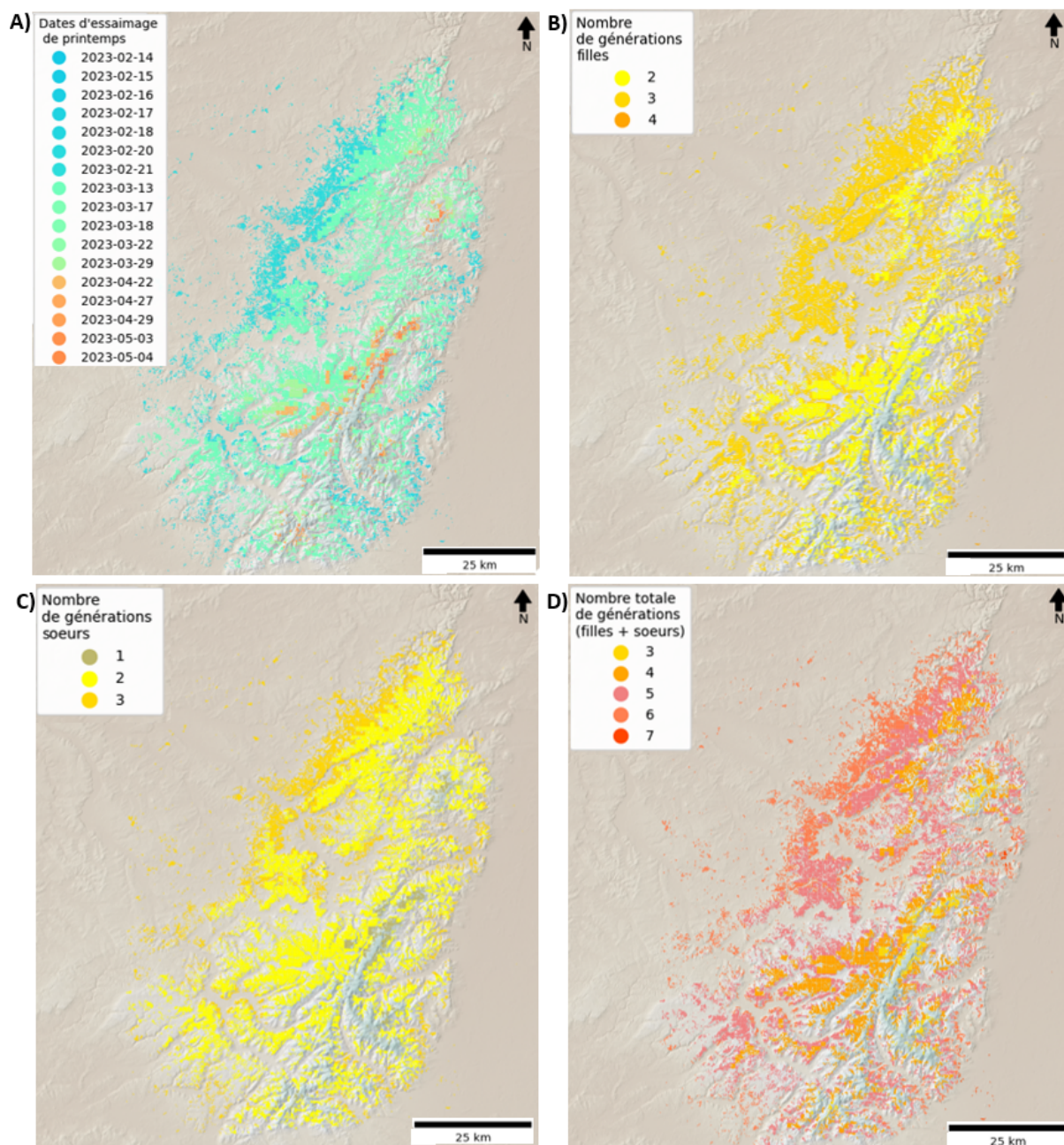


Figure 13: Cartes des variables prédites par RITYPY jusqu'au 01-01-2023 au 01-11-2023 (de gauche à droite et de haut en bas : A) Carte d'essaimage de printemps, B) Carte du nombre de génération fille, C) Carte du nombre de génération sœur, D) Carte du nombre total de générations.)

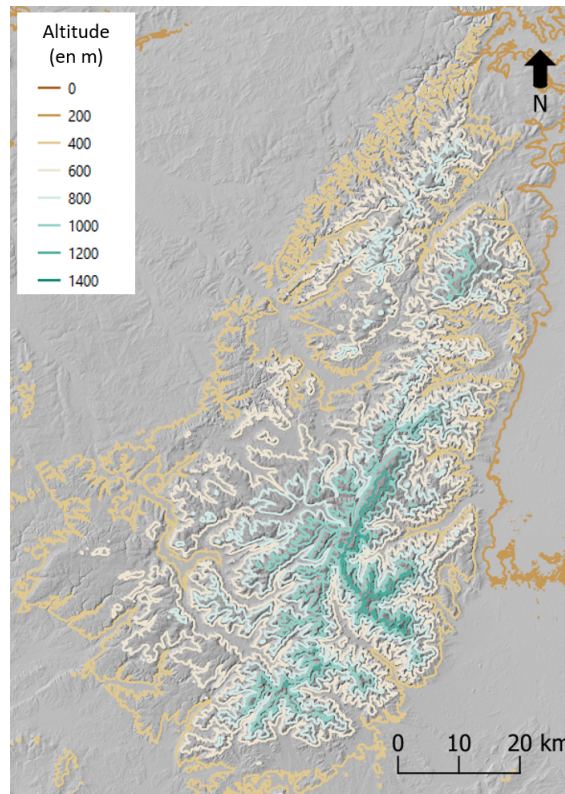


Figure 14: *Cartes des altitudes (courbes de niveaux) sur la maille 32ULU*

### Synthèse du 3.1

- Pour l'année 2023, les scolytes essaient majoritairement durant le mois de mars mais les premières dates sont observées dès la mi-février.
- Une corrélation avec l'altitude est visible aussi bien pour les dates d'essaimage que pour le nombre de générations prédites. Les dates d'essaimages sont plus tardives et moins de générations sont prédites sur les zones les plus élevées, ce qui est cohérent avec la biologie de l'insecte, conditionnée par la température.

## 3.2 Comparaison des cartes phénologiques avec les sorties cartographiques FORDEAD

La comparaison entre les données FORDEAD et RITYPY s'effectue sur les sous-polygones résultant de la superposition entre le masque forêt et les mailles des données ANASTASIA. Cette comparaison prend la forme d'un graphique en escalier auquel se superpose une frise chronologique (figure 17).

Le graphique en escalier représente l'augmentation de la surface (en m<sup>2</sup>) du sous-polygone classé en anomalies par la chaîne FORDEAD sur une année, de janvier à décembre avec un pas de temps mensuel. Les données de FORDEAD utilisées ici sont les synthèses mensuelles qui regroupent toutes les anomalies détectées au cours d'un mois, sans précision sur la date de classement « anomalies ». Le cumul est représenté à la fin du mois par une « marche d'escalier ».

Certains mois ne présentent pas de données, un point rouge est ajouté au sommet de la marche pour les mois présentant des données afin de différencier une absence d'anomalies détectées d'une absence de données.

Il faut rappeler ici que pour qu'un pixel apparaisse comme « anomalie », il faut qu'une anomalie radiométrique de l'indice CRSWIR (interprétée biologiquement comme une anomalie de flux hydrique) soit détectée trois fois de suite. Il ne s'agit donc pas de la date d'apparition de l'anomalie mais de la date à laquelle l'anomalie est considérée comme telle par FORDEAD.

La frise chronologique superposée représente le développement des scolytes prédit par RITYPY sur le sous-polygone considéré. Le développement des générations filles et sœurs, notées respectivement Fx et Sx, est symbolisé par un dégradé de turquoise ou de mauve, respectivement pour les générations filles et les générations sœurs. Les couleurs représentent les différents stades de développement, le stade œuf correspondant à la couleur la plus claire et le stade adulte immature à la plus foncée. La longueur de chaque rectangle de couleur correspond à la durée passée dans ce stade ou entre deux événements. Par exemple, le rectangle bleu (figure 17) correspond à la durée entre la date d'essaimage et la date du début de l'infestation par la première génération parentale de la saison (P). Les dates clés, à savoir la date d'essaimage de printemps, la date du début de l'infestation et les dates d'émergences des différentes générations filles et sœurs, sont symbolisées par des traits pointillés verticaux.

La superposition de ces deux graphiques doit permettre de déterminer s'il y a une relation entre les (télé)observations issues de FORDEAD et les dates clés de développement des populations de scolytes, ou avec un stade de développement particulier (par exemple le stade larve).

Les comparaisons entre les anomalies détectées par FORDEAD et le développement des populations de scolytes prédit par RITYPY ont pour l'instant été réalisées sur la seule année 2023, et pour 4 sous-polygones de forêts de la maille 32ULU (figures 17 et 18 pour les sous-polygones 1 et 3 et annexe A pour les sous-polygones 2 et 4). Ces sous-polygones ont été choisis aléatoirement parmi ceux présentant des anomalies détectées au cours de l'année 2023 et appartenant à 3 classes différentes de nombre total de générations prédites (figure 13-D). 4 générations de scolytes sont prédites sur le sous-polygone 2, 5 générations sur les sous-polygones 3 et 5, et enfin 6 générations sur le sous-polygone 4.

Pour note, les sorties mensuelles FORDEAD de 2023 ne sont pas disponibles pour les mois de janvier, mars et juillet. Nous pouvons supposer que la nébulosité (la couverture nuageuse) était trop importante pour avoir des images SENTINEL-2 exploitables sur ces périodes.

Nous observons qu'une forte augmentation de surfaces classées en anomalies se produit durant les mois de juillet et août pour les sous-polygones 1, 3 et 4. Ces mois correspondent aussi aux périodes où le plus de générations de scolytes sont en développement (4 générations pour les trois sous-polygones), c'est-à-dire pendant lesquelles le plus de dégât est fait. Cette comparaison semble donc bien montrer l'existence d'un lien entre l'augmentation des anomalies détectées par FORDEAD et la biologie des scolytes sur ces sous-polygones.

Nous pouvons supposer que l'augmentation observée en août se produit plus spécifiquement en juillet, puisque c'est précisément sur ce mois que le nombre de générations en développement est le plus important. Cependant, l'absence de données FORDEAD pour le mois de juillet pour cette année ne permet pas de le vérifier.

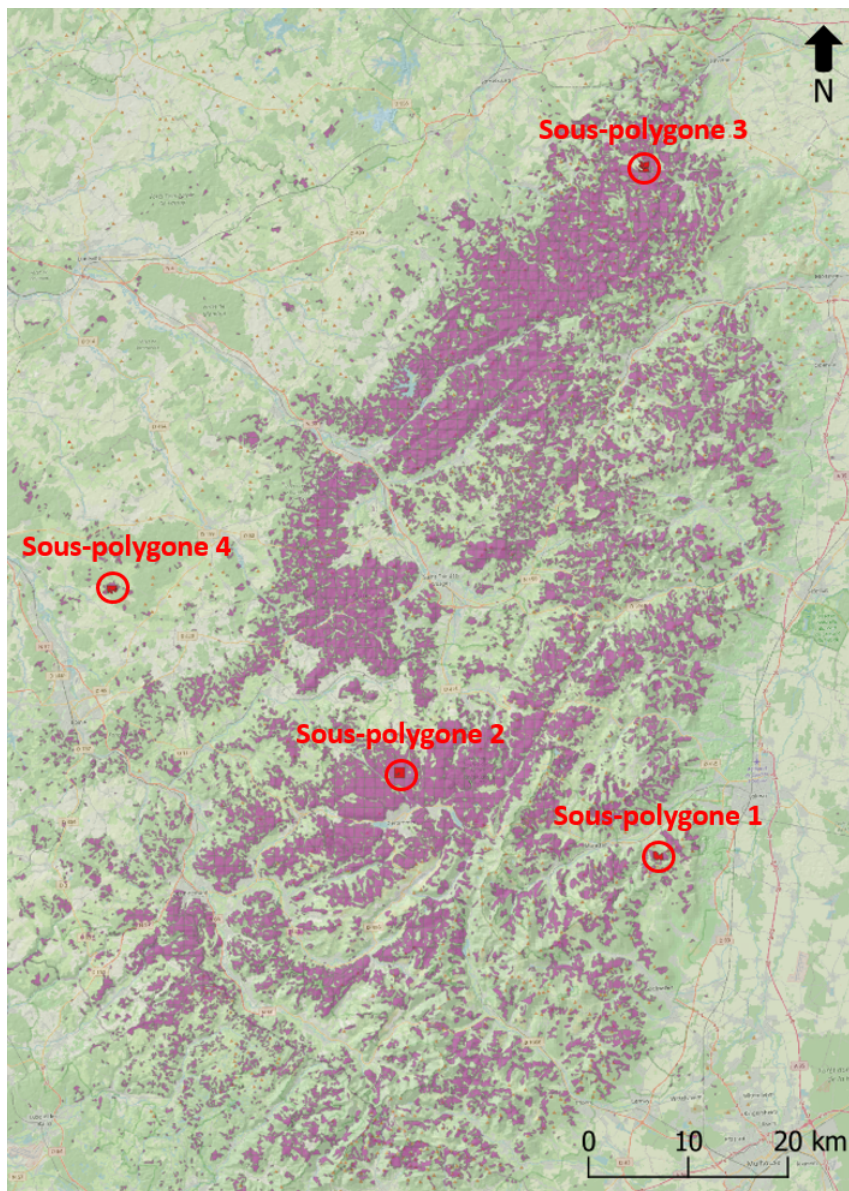


Figure 15: Localisation des sous-polygones étudiés



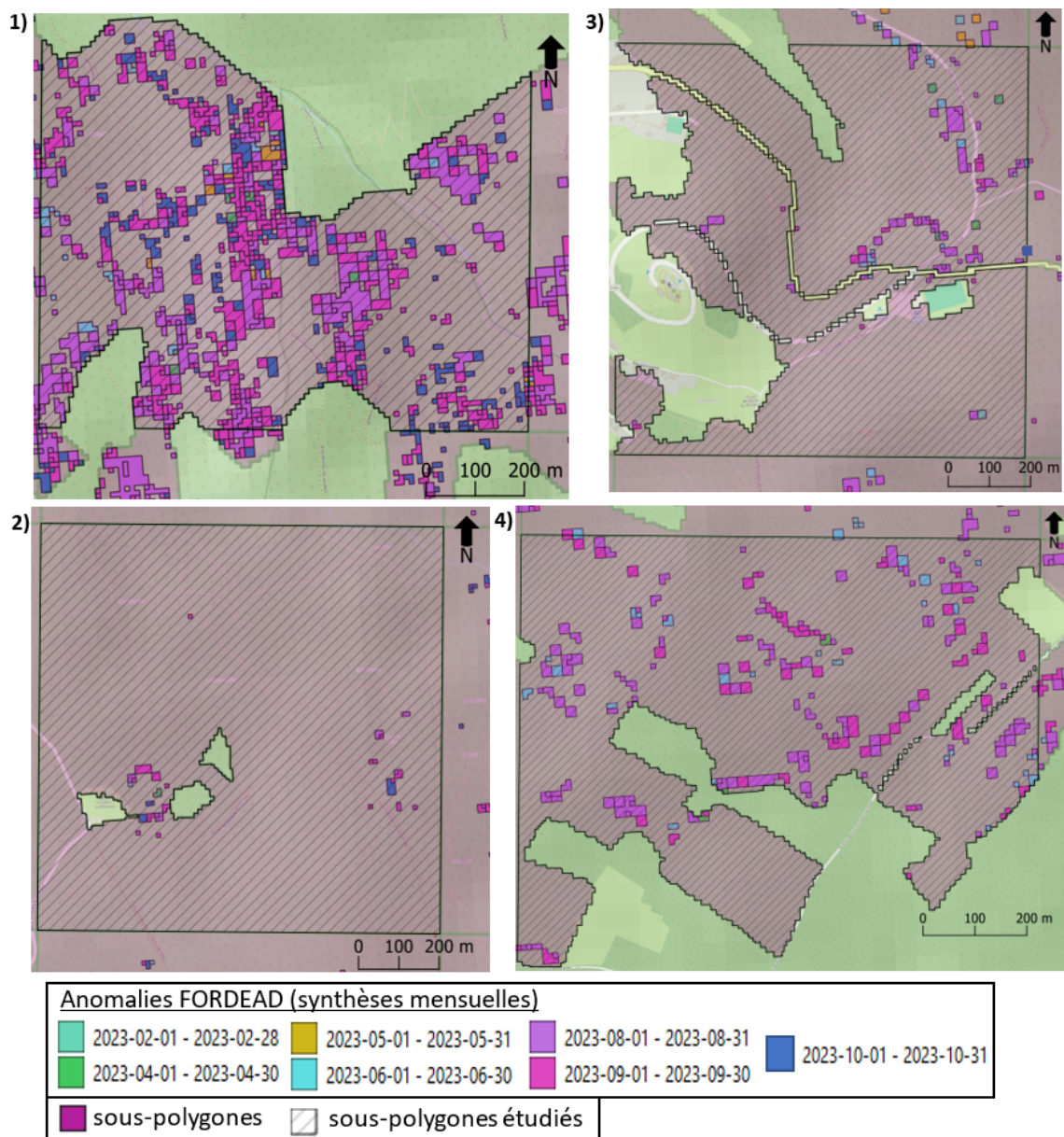


Figure 16: Anomalies FORDEAD détectées en 2023 sur les sous-polygones étudiés (de gauche à droite et de haut en bas : sous-polygone 1, sous-polygone 3, sous-polygone 2, sous-polygone 4)

Le sous-polygone 1 présente des fortes augmentations d'anomalies en septembre et octobre (figure 17). Cependant, d'après la frise chronologique, les dernières générations de scolytes, F3 et S2, ont fini de se développer depuis début septembre. Il est possible que RITYPY ait sur-estimé la durée de développement des générations, menant à une émergence de F3 et S2 avant la date de fin de reproduction (située autour du 10 août en France) et au développement de nouvelles générations durant septembre et octobre. De plus, la fin de l'activité de reproduction des scolytes n'est pas uniquement conditionnée par la photopériode comme ce qui est implémenté dans RITYPY, elle peut continuer sur la fin de saison (septembre, octobre, novembre) si les températures le permettent (Doležal and Sehnal, 2007; Schebeck et al., 2017). Il est aussi probable que ces fortes augmentations ne soit pas dues aux scolytes mais à d'autres causes de dépérissement comme une sécheresse tardive, ce qui serait plutôt encourageant quand à l'utilité de notre modèle pour aider à contextualiser la détection des anomalies.

En comparant les résultats des sous-polygones 1 et 3, nous pouvons constater de grandes différences dans les valeurs de surface classées en anomalie. Or, le développement des scolytes sur ces deux sous-polygones est similaire : le même nombre total de générations est prédit et les dates d'émergence pour une même génération entre les deux sous-polygones ne diffèrent que de quelques jours. Cette différence de surface pourrait s'expliquer, soit par un nombre de scolytes moins important sur le sous-polygone 3, colonisant ainsi moins d'arbres et faisant donc moins de dégâts, soit par une plus petite surface d'épicéas encore sains en 2023. En effet, le masque forêt ne change pas entre le début de la crise en 2018 et 2023, pourtant, de nombreuses zones ont disparu à cause des dépérissements dus aux attaques de scolytes et aux sécheresses des années précédentes. Il serait donc logique que moins de surfaces soient classées en anomalies sur le polygone 3 si la surface saine disponible début 2023 est plus petite que celle du polygone 1. Ceci pourrait se vérifier en regardant les anomalies détectées par FORDEAD depuis 2018 et en retirant annuellement du masque forêt ces surfaces impactées.

Enfin, notre modèle semble pouvoir lier les anomalies détectées par FORDEAD au développement des scolytes et pourrait donc aider à mieux différencier les anomalies dues à des scolytes de celles provoquées par d'autres causes de dépérissement. Cependant, davantage de comparaisons sont nécessaires pour pouvoir l'affirmer.

De plus, afin de pouvoir conclure sur une éventuelle corrélation entre l'augmentation des anomalies et le développement d'une génération de scolytes, il serait nécessaire d'avoir des sorties de FORDEAD à une résolution temporelle plus fine, par exemple à chaque fois qu'une image SENTINEL-2 est exploitable. Cela permettrait d'avoir des images tous les 5 jours dans les meilleurs des cas, soit 6 images par mois. Malheureusement, la zone d'étude est souvent ennuagée, ce qui rend ce nombre peu réaliste. La comparaison entre les sorties FORDEAD et RITYPY des années précédentes permettrait de préciser et vérifier ces hypothèses.

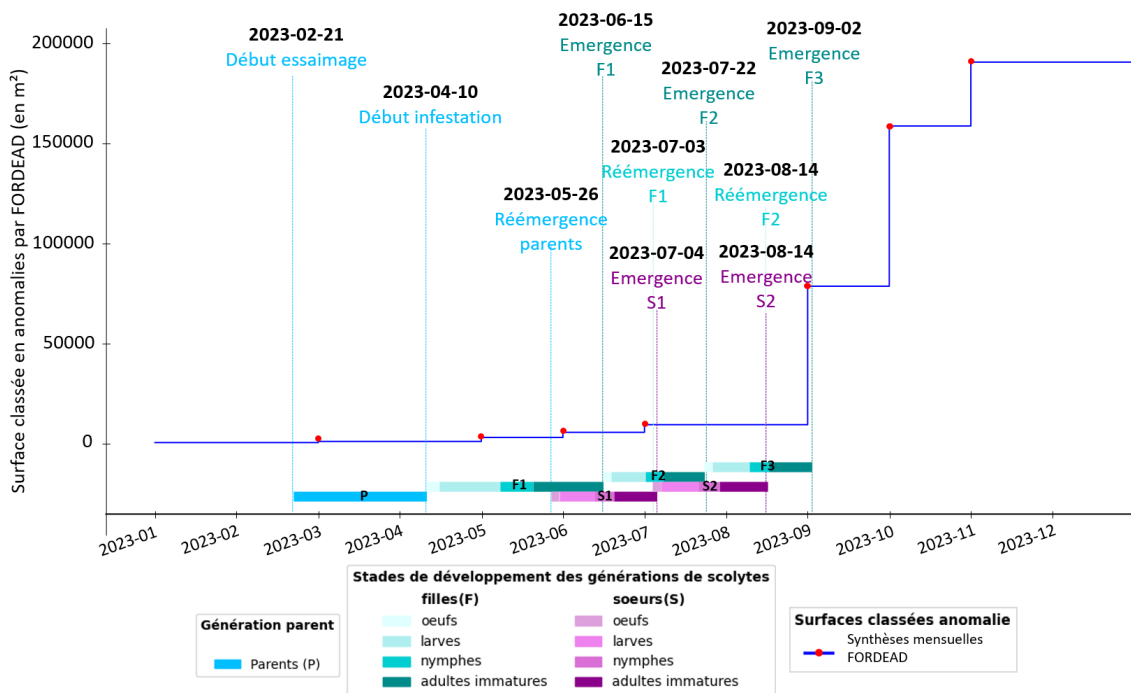


Figure 17: Comparaison entre l'évolution des surfaces classées en anomalies par FORDEAD et le développement des scolytes prédit par RITYPY pour l'année 2023 (sous-polygone 1)

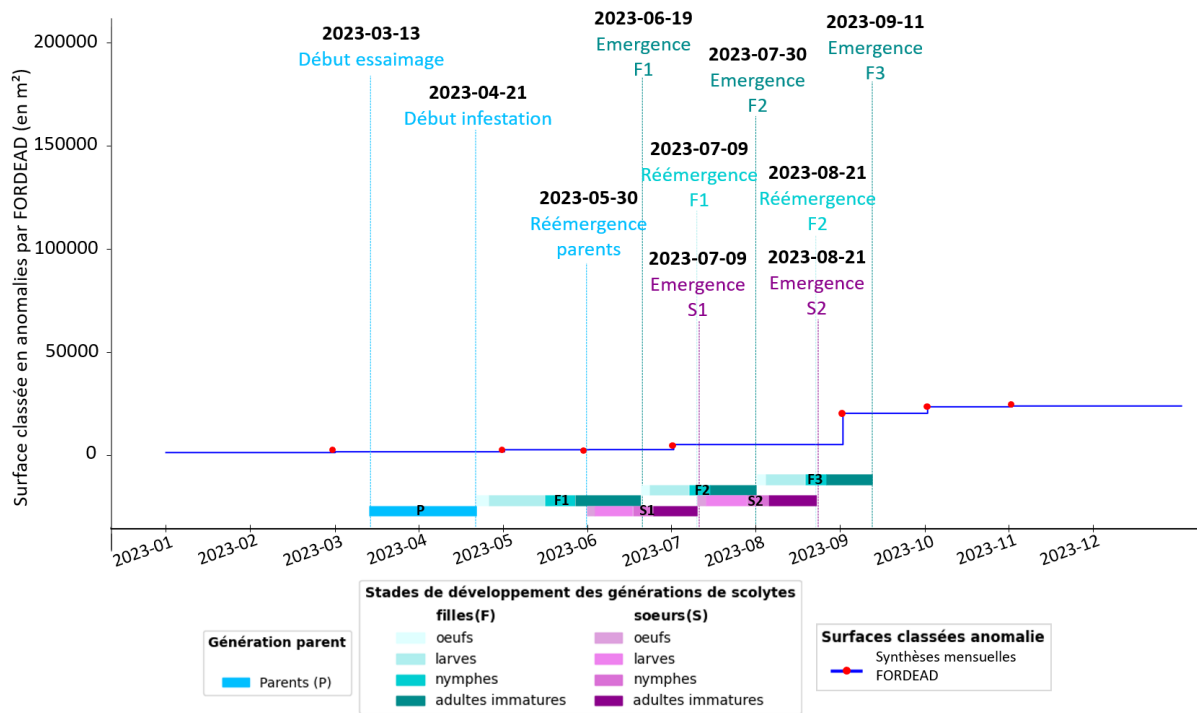


Figure 18: Comparaison entre l'évolution des surfaces classées en anomalies par FORDEAD et le développement des scolytes prédit par RITYPY pour l'année 2023 (sous-polygone 3)

## Synthèse du 3.2

- Une forte augmentation de surfaces classées en anomalies se produit durant les mois de juillet et août, ce qui correspond aussi aux périodes où le plus de générations de scolytes sont en développement.
- Des augmentations d'anomalies sont observées après le développement des dernières générations prédites. Soit elles sont dues à d'autres causes de dépérissement, soit la durée de développement des générations est sur-estimée RITYPY, soit le paramètre d'arrêt de reproduction, à savoir la photopériode, simplifie trop la réalité et des générations continuent de se développer grâce à des températures encore assez élevées.
- Une grande différence de valeur de surface classée en anomalie peut être observée entre deux sous-polygones présentant un développement de scolytes similaire. Cela pourrait être dû à une différence de surface d'épicéas sains en début de saison.
- Des sorties de FORDEAD à une résolution temporelle plus fine permettrait peut-être de lier la détection des anomalies à des stades de développement précis.

## 4 Discussions et Perspectives

A partir de données de température mises à disposition librement par Météo-France, nous avons pu cartographier les différents stades phénologiques du scolyte de l'épicéa pour l'année 2023, à une résolution de 1 km. Nous avons mis qualitativement en relation ces sorties phénologiques avec celles de la chaîne de télédétection FORDEAD, qui permet de prédire des anomalies provoquées par des attaques de scolytes. Nous revenons dans cette partie sur certains choix méthodologiques effectués, ou sur certaines difficultés techniques rencontrées lors de notre étude, et nous discutons de leurs effets sur nos résultats. Enfin, nous abordons quelques pistes d'améliorations du modèle.

### 4.1 Discussion sur les méthodes utilisées

#### 4.1.1 Sources des données Tmax et alternatives

Notre modèle phénologique de développement des scolytes a été réalisé en suivant le modèle RITY-2 mais certaines parties diffèrent entre ces 2 modèles. Ainsi, RITYPY utilise les données de température AROME et ANASTASIA pour estimer la Tmax alors que RITY-2 utilise le système INCA. Ce système, contrairement à AROME, a été spécialement développé pour estimer la température dans les zones montagneuses (Haiden et al., 2011). INCA pourrait donc potentiellement se montrer plus performant sur notre zone d'étude. Cependant, bien que les données INCA semblent produites sur notre zone d'étude (massif des Vosges) (Institut Royal Météorologique de Belgique, 2023), elles ne semblent pas être librement mises à disposition, et nous n'avons pas identifié le moyen de les acquérir durant ce stage. Leur absence sur le reste de la France hexagonale limiterait de toute façon la généralisation de notre approche RITYPY à d'autres régions touchées par les scolytes.

Les valeurs de Tmax estimées avec les données AROME seront critiquées dans une partie suivante (partie 4.2).

Il aurait également pu être possible d'utiliser les valeurs de Tmax mesurées aux stations météo présentes sur la zone d'étude. L'interpolation de ces données à partir d'une valeur de gradient adiabatique fixée (p. ex.  $5\text{ °C.km}^{-1}$ ) et l'utilisation d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) pour mesurer les différences d'altitude, pourrait potentiellement permettre d'obtenir des résultats autant, voire plus satisfaisants. De plus, l'utilisation d'AROME et ANASTASIA nécessite la manipulation de formats de fichier spécifiques aux domaines de la météorologie / climatologie (netcdf, grib2), alors que l'interpolation des données ponctuelles issues des stations météo reste un traitement simple, qui peut être effectué sous un SIG comme QGIS par exemple. Néanmoins, une telle méthode ne permet pas de disposer de données prévisionnelles, comme c'est le cas avec AROME (2 jours de prévision).

Enfin, il a été décidé par souci de simplification de n'utiliser que la Tmax de l'air comme indiqué dans la méthode RITY-2. Le modèle phénologique PHENIPS, dont est dérivé RITY-2, utilise pour sa part la variable de rayonnement solaire global pour estimer le temps de développement des scolytes, et non la Tmax. Cette variable de rayonnement apparaît plus difficile à calculer, mais pourrait s'avérer davantage corrélée aux durées associées aux différentes phases de développement de l'insecte.

#### **4.1.2 La comparaison graphique entre RITYPY et FORDEAD**

La méthode de comparaison entre les données d'anomalies FORDEAD et les sorties de RITYPY peut également être critiquée. En effet, les résultats FORDEAD utilisés sont les synthèses mensuelles d'anomalies. Or, comme mentionné dans la partie 3.2, c'est la date de classement comme « anomalie » (atteinte après la détection de trois anomalies successives) qui est utilisée et non la date d'apparition de l'anomalie. Cette dernière peut se produire le mois précédent et correspondrait sûrement mieux à la biologie des scolytes. Son utilisation, couplée à des sorties avec une résolution temporelle plus fine comme évoquée à la fin de la partie 3.2, permettrait d'affiner la comparaison et de mieux correspondre au développement de l'insecte.

Enfin, une comparaison cartographique aurait également pu être possible. Par exemple, en superposant les cartes d'apparitions d'anomalies FORDEAD avec une carte représentant le stade phénologique de la génération de scolyte en cours de développement sur le sous-polygone. Cette comparaison pourrait permettre de lier plus précisément les apparitions d'anomalies à un stade de développement. Cette technique étant un peu plus longue à mettre en place, elle n'a pas été réalisée dans notre étude.

## Synthèse du 4.1

- L'utilisation d'autres sources de données de température comme le système INCA ou les stations météo permettrait peut être d'obtenir des résultats plus satisfaisants et/ou pourrait être plus facilement mis en place.
- L'utilisation d'autres variables, comme le rayonnement global, pour estimer le développement des scolytes pourrait peut être permettre d'obtenir des résultats plus justes.
- La comparaison cartographique entre les sorties de FORDEAD et de RITYPY pourrait être améliorée en utilisant la date d'apparition des anomalies et une échelle temporelle plus fine.

## 4.2 Discussion sur l'utilisation des données de température AROME

Afin de vérifier la qualité de l'estimation de la Tmax par notre algorithme, nous avons comparé la Tmax mesurée aux stations météorologiques présentes sur la maille 32ULU et la Tmax estimée par notre algorithme au point AROME le plus proche de chaque station.

Il semble important de rappeler que les résultats présentés dans la partie 3 ont été obtenus avec les données ANASTASIA et non les données AROME. Les données AROME sont utilisées dans la preuve de concept pour un modèle opérationnel de prévision de développement des scolytes, mentionnée dans la partie 2.5.1.

Pour la date du 06/06/2024 et la Tmax obtenue à partir des estimations AROME réalisée à 12h, il s'avère qu'il existe une différence pour presque toutes les stations, comprise entre 1 °C et 4 °C (figure 19). Une telle différence avec les valeurs réelles pose problème puisque la simulation du développement des scolytes prédit par RITYPY sera impactée.

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer cette différence : la différence d'altitude entre les points AROME utilisés et les stations météo, une erreur dans l'algorithme de récupération de la Tmax ou dans la requête envoyée à l'API.

Concernant la première hypothèse, cette différence ne semble pas due à la différence d'altitude entre le point le plus proche et les stations puisque les différences les plus importantes sont observées pour des points montrant une différence d'altitude de 10 m ou moins avec la station la plus proche (figure 19). C'est le cas de la station EBERSHEIM, qui présente une différence de température de 4 °C avec le point le plus proche avec lequel il n'y a qu' 1 m de différence d'altitude.

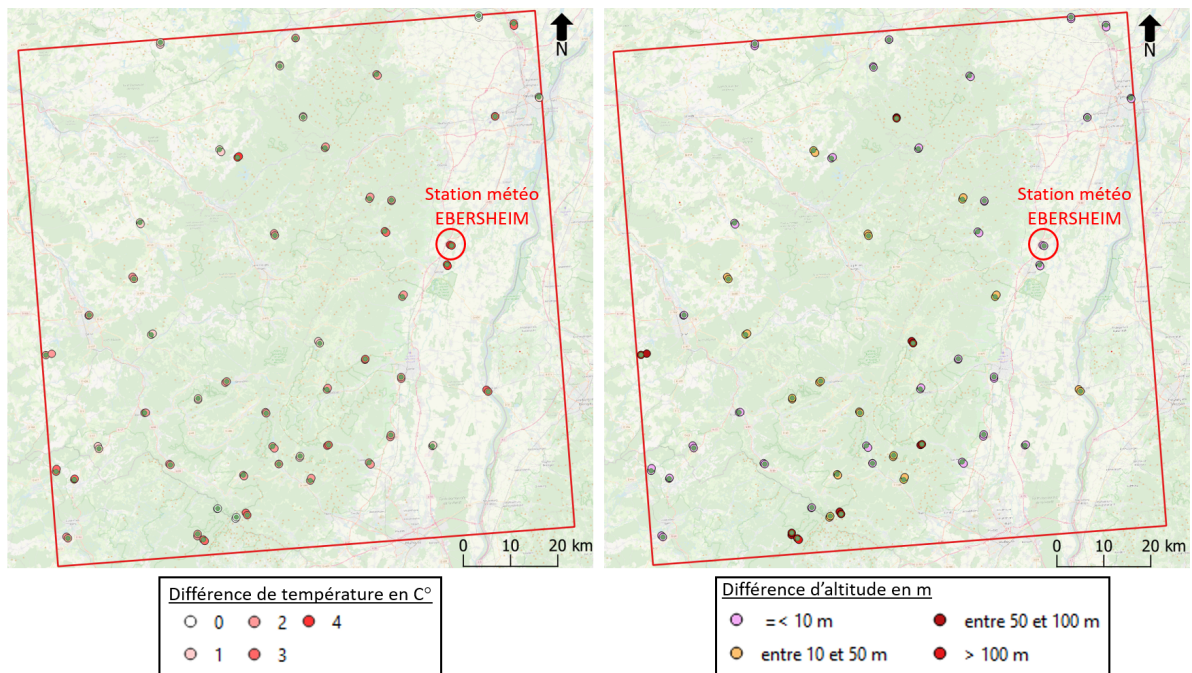


Figure 19: A gauche : Différence entre les Tmax mesurées aux stations météo de la maille 32ULU et les Tmax simulées pour les points de grille AROME les plus proches des stations (le 06/06/2024). A droite : Différence d'altitude entre les stations météo de la maille 32ULU et les points AROME les plus proches des stations

Afin de tester les hypothèses suivantes, nous nous sommes intéressés aux différences entre les estimations faites à 3h et à 12h. En effet, nous avons également voulu déterminer s'il y avait une différence sur la valeur de la Tmax récupérée pour des estimations faites à 3h ou à 12h. Pour cela, nous avons fait la différence entre la valeur de la Tmax estimée à 12h et la Tmax estimée à 3h le 06/06/2024 pour tous les points AROME de la maille 32ULU (figure 20). De nouveau, une différence allant de 1°C à 5°C est observée pour la plupart des points.

Afin de vérifier si cette différence venait de l'algorithme de récupération de la Tmax, nous avons comparé la température prédite pour 12h estimée par AROME à 3h et à 12h. Comme précédemment, nous avons fait la différence entre les valeurs de 12 h et celles de 3 h, pour les dates du 20/06/2024 et du 26/06/2024 (figure 21). Cette fois, les différences de température vont de -5 °C à 4 °C pour le 20/06 et de -9 °C à 4 °C pour le 26/06. Cela ne semble donc pas venir d'un souci d'algorithme. De plus, il ne semble pas y avoir d'erreur systématique en fonction du point considéré. Des comparaisons sur d'autres jours sont néanmoins nécessaires avant de pouvoir l'affirmer.

Enfin, pour vérifier que cette différence ne venait pas de la requête envoyée à l'API, nous avons comparé les données obtenues avec l'API et les données téléchargeables sur le site internet de Météo-France. Aucune différence n'est constatée pour la température prédite pour 12h estimée à 12h entre les données de l'API et celles du site internet. Il ne semble donc pas qu'il y ait une erreur dans la formulation de la requête.

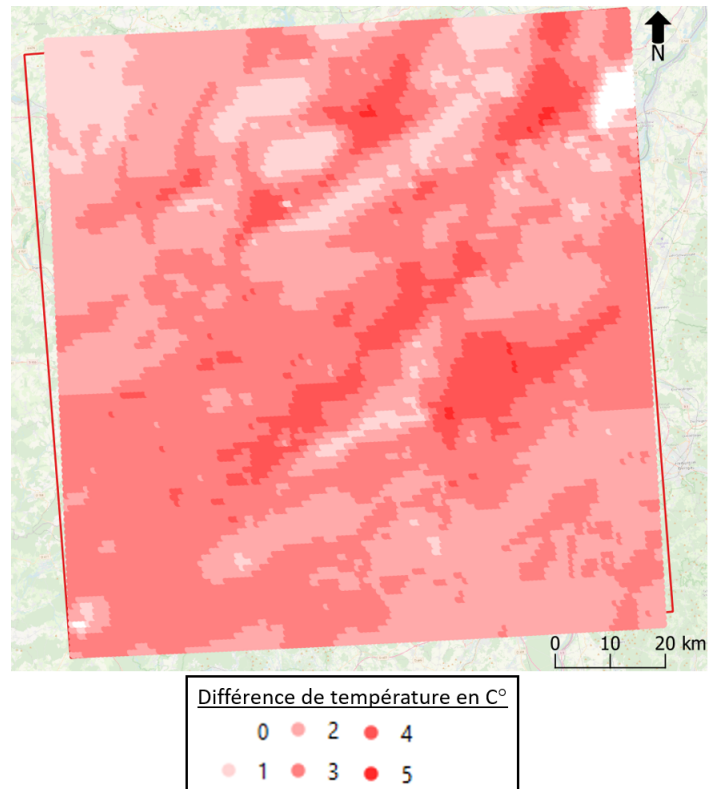


Figure 20: *Différence de Tmax entre les estimations AROME de 3h et de 12h sur les points de la maille 32ULU (le 06/06/2024).*

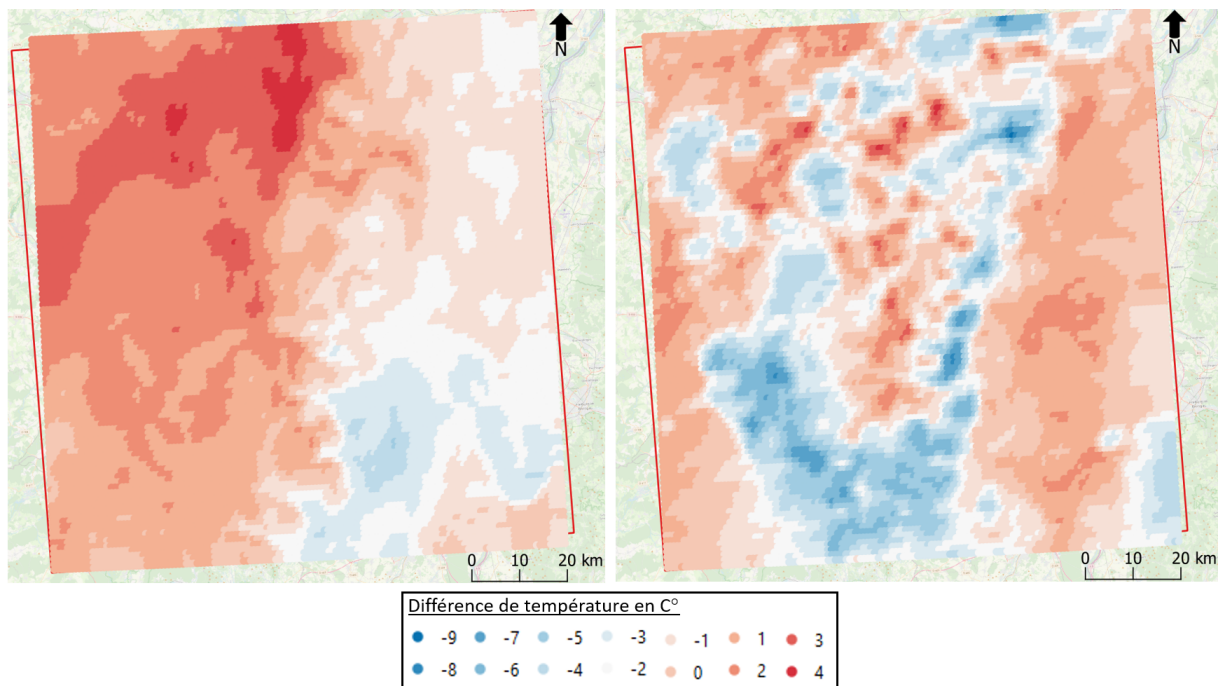


Figure 21: *Différence de température prédite pour 12h entre les estimations AROME de 3h et de 12h sur les points de la maille 32ULU (le 20/06/2024 à gauche et le 26/06/2024 à droite)*



AROME est le modèle prévisionnel utilisé pour les prévisions météo de Météo-France, il est donc surprenant d'obtenir de telles différences pour des valeurs estimées à 9 h d'intervalle. Nous avons donc contacté Météo-France pour essayer de déterminer d'où provenait cette différence. Après discussion avec Stéphane Van-Hyfte, météorologue à Météo-France à la Direction de la climatologie et des services climatiques (DCSC), il s'avère qu'il n'y a pas d'erreurs dans la requête interrogeant l'API ou dans le code estimant la Tmax. Ces différences sont donc bien intrinsèques au modèle AROME. Bien que les comparaisons doivent être faites sur davantage de dates pour pouvoir réellement conclure, nous pouvons estimer que les prévisions de Tmax à partir des données de température AROME ne permettent pas de prédire le développement des scolytes de façon réaliste.

Néanmoins, les sorties de RITYPY pourraient être corrigées le lendemain avec les données d'analyse AROME, plus fiables mais ne permettant pas de prévisions. Il est aussi possible que les prévisions AROME soient plus fiables à une échelle spatiale plus agrégée (par exemple, pour des points espacés de 10 km au lieu de 1 km). Des tests sont en cours pour le vérifier. Le passage à une échelle plus grande permettrait peut-être de pouvoir corriger les erreurs d'AROME à plus fine échelle et d'obtenir une meilleure estimation du développement des scolytes par notre modèle.

La qualité des résultats de RITYPY serait sûrement meilleure en utilisant d'autres méthodes d'estimation de la Tmax comme celles évoquées dans la partie précédente (4.1.1) (Tmax des stations météo interpolées avec un MNT, utilisation du rayonnement solaire global).

#### Synthèse du 4.2.

- Des différences, pouvant aller jusqu'à 4 °C, entre les Tmax mesurées aux stations météo et les points AROME les plus proches ont été observées.
- De grandes différences de températures ont été observées pour des estimations d'AROME espacés de 9h pour une même heure.
- Les données de température AROME ne semblent pas assez précises à une échelle de 1 km et leur utilisation pourraient mener à des erreurs dans l'estimation du développement des insectes.

### 4.3 Adaptation au Grand-Est et à d'autres régions de France hexagonale

Les différents paramètres utilisés par RITYPY, comme les coefficients des régressions linéaires utilisées pour le calcul de l'air de la forêt ou de la température effective du bois, sont ceux estimés pour le modèle d'origine RITY-2. Or, ces coefficients ont été estimés ou vérifiés par des observations de terrain sur la Slovaquie, territoire d'application du modèle. Le contexte géographique n'étant pas le même que celui de la région Grand-Est, ces valeurs peuvent être différentes pour cette dernière. Des études de terrain seraient donc souhaitables pour affiner les résultats de RITYPY.

Sur le modèle des expériences terrain menées pour RITY-2, la température de l'air dans la forêt et la température de l'écorce pourraient être vérifiées tout le long de la saison à l'aide de capteurs de température. Les valeurs ainsi mesurées permettraient de corriger les coefficients de la formule liant la Tmax de l'air à celle de la forêt et de l'écorce.

Pour vérifier la phénologie, des pièges à phéromones pourraient être posés dans la zone d'étude en début de saison afin de vérifier les premières dates d'essaimage de printemps ainsi que les dates d'émergences des générations filles et sœurs (bien que les dates d'émergences soient difficiles à vérifier sur le terrain à cause de la superposition de plusieurs générations). Ce type d'expérience a déjà été réalisé dans la région Grand-Est mais les résultats n'ont pas encore pu être exploités pour les confronter aux sorties de RITYPY.

Bien que ces valeurs ne soit pas encore vérifiées sur la région Grand-Est, toutes sont paramétrables dans RITYPY, il sera donc facile de corriger le modèle une fois que les bonnes valeurs auront été déterminées. De plus, cette possibilité de paramétrage permet donc l'adaptation du modèle à d'autres régions de France, tant qu'il est possible d'obtenir une mesure de température maximale de l'air et la valeur de la photopériode.

#### **4.4 La complexification du modèle vers un modèle de réaction-diffusion**

RITYPY est un modèle purement qualitatif et il n'estime pas le nombre de scolytes présents sur une zone. Or, cette variable pourrait être utile dans le suivi de l'évolution de la crise. Il pourrait être intéressant de transformer RITYPY en modèle de dynamique de population afin d'estimer quantitativement le développement des populations de scolytes. Par ailleurs, la comparaison avec la chaîne FORDEAD pourrait être affinée en estimant la dynamique spatiale des foyers. Ceci pourrait être réalisé avec un modèle de réaction-diffusion tel que ceux décrits par Rocques (Rocques, 2013). Ce type de modèle nécessite de nombreux paramètres : environnementaux (composition de la forêt, topographie, etc.), comportementaux (vol des scolytes, etc.) et météorologiques (direction et puissance du vent, etc.). Ces variables ne sont pas évidentes à identifier, mais le développement d'un tel modèle pourrait s'avérer très utile dans la lutte contre les scolytes et la contextualisation des sorties de FORDEAD.

## **Conclusion**

Nous avons adapté le modèle phénologique de développement des scolytes typographes RITY-2 en une version Python, nommée RITYPY, qui pourra être plus facilement reprise et adaptée dans le futur. Les simulations du modèle ont été effectuées dans la région Grand-Est sur la maille SENTINEL-2 32ULU en limitant l'emprise spatiale aux zones forestières contenant des épicéas, et en intégrant les données de température obtenues via l'API du modèle de Météo-France AROME à partir de juin 2024, et avec les archives du modèle ANASTASIA pour les années précédentes.

Les sorties cartographiques mensuelles, réalisées à partir des archives de température du modèle ANASTASIA, permettent de suivre l'évolution des populations de scolytes sur les zones étudiées tout au long d'une année donnée. La confrontation avec des données terrains serait nécessaire afin, d'une part, de mieux adapter les paramètres d'entrées du modèle aux zones étudiées, notamment pour les coefficients de corrélation entre la température de l'air et la température de la forêt, et d'autre part, de vérifier la qualité des prédictions du modèle.

Les comparaisons entre les surfaces classées en anomalies par FORDEAD et les dates clefs de développement des scolytes prédites par RITYPY semblent montrer que les plus fortes augmentations de surfaces classées en anomalies se produisent pendant les mois de juillet et août, mois où le plus grand nombre de générations de scolytes sont en développement. Il reste cependant nécessaire d'effectuer ce type de comparaison sur d'autres années, et sur d'autres zones,

avant de pouvoir confirmer qu'il existe effectivement une corrélation entre les 2 types de sortie. Dans ce cas, le modèle phénologique développé durant ce stage permettrait de mieux contextualiser les sorties de la chaîne de télédétection FORDEAD.

L'évaluation de la qualité de récupération de la Tmax a montré que les prévisions du modèle AROME reste largement fluctuante même pour des prévisions proches dans le temps (delta de 9h). Cette constatation implique une certaine prudence dans l'usage de ces données, puisque cela pourrait fausser les prévisions de développement des scolytes. L'utilisation d'une autre source de données, comme l'interpolation des Tmax des stations météo avec un MNT, ou d'une autre méthode, comme l'utilisation du rayonnement global pour estimer le développement des scolytes, permettrait peut-être d'obtenir des résultats plus fiables. Ces prévisions présentent cependant un intérêt dans l'identification des zones à surveiller en priorité dans la lutte contre les scolytes.

Bien que son apport reste encore à évaluer davantage, par construction RITYPY présente la possibilité d'être facilement appliqué sur différentes régions de France hexagonale impactées par les attaques de scolytes, comme par exemple la Bourgogne-Franche-Comté.

## Références bibliographiques

- Baier, P., Pennerstorfer, J. and Schopf, A. (Sept. 30, 2007). PHENIPS—A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. *Forest Ecology and Management* 249.3. Number: 3, pp. 171–186. ISSN: 0378-1127. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.05.020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112707004057>.
- Baumeister, M. et al. (Apr. 2020). *Itinéraires techniques de Picea abies*. URL: [https://www.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/epicea\\_commun\\_compressed.pdf](https://www.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/epicea_commun_compressed.pdf).
- Colombet, P. (2024). *Codes RITYPY*. GitLab. URL: <https://forgemia.inra.fr/umr-tetis/ritypy>.
- Delpont, F., Albert, A. and Ulrich, E. (2021). La crise des scolytes de l'épicéa : une tempête silencieuse sans précédent. Office national des forêts. *Rendez-vous techniques de l'ONF* 69, pp. 3–8. ISSN: 1763-6442. URL: <https://www.onf.fr/onf/+cec::les-rendez-vous-techniques-de-lonf-no69-70.html>.
- Département de la Santé des Forêts, . (2018). *Lutte contre le typographe*. URL: [https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Typographe\\_Plaquette\\_cle01d64a.pdf](https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Typographe_Plaquette_cle01d64a.pdf).
- Doležal, P. and Sehnal, F. (2007). Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the bark beetle *Ips typographus*. *Journal of Applied Entomology* 131.3. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1439-0418.2006.01123.x>, pp. 165–173. ISSN: 1439-0418. DOI: 10.1111/j.1439-0418.2006.01123.x. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-0418.2006.01123.x>.
- Dutrieux, R., Féret, J.-B. and Ose, K. (2021a). Mise au point d'une méthode reproductible pour le suivi généralisé des dégâts de scolytes par télédétection satellitaire. Office national des forêts. *Rendez-vous techniques de l'ONF* 69, pp. 37–43. ISSN: 1763-6442. URL: <https://www.onf.fr/onf/+cec::les-rendez-vous-techniques-de-lonf-no69-70.html>.
- Dutrieux, R., Féret, J.-B. and Ose, K. (2021b). Panorama des méthodes issues de la recherche et perspectives opérationnelles. Office national des forêts. *Rendez-vous techniques de l'ONF* 69, pp. 21–27. ISSN: 1763-6442. URL: <https://www.onf.fr/onf/+cec::les-rendez-vous-techniques-de-lonf-no69-70.html>.
- European Space Agency, . (2024a). *Overview - Sentinel-2 MSI - User Guides*. Sentinel Online. URL: <https://sentinel.esa.int/en/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/overview>.
- European Space Agency, . (2024b). *Spatial Resolutions - Sentinel-2 MSI - User Guides*. Sentinel Online. URL: <https://sentinel.esa.int/en/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions>.
- Gouvernement du Canada, . (Dec. 31, 2013). *Champignon de bleuissement*. Last Modified: 2015-08-04. URL: <https://www.ravageursexotiques.gc.ca/details-ei/maladie/1000143>.
- Groot, M. de and Ogris, N. (Oct. 15, 2019). Short-term forecasting of bark beetle outbreaks on two economically important conifer tree species. *Forest Ecology and Management* 450, p. 117495. ISSN: 0378-1127. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117495. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112719305584>.

- Haiden, T. et al. (Apr. 1, 2011). The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting* 26.2. Publisher: American Meteorological Society Section: Weather and Forecasting, pp. 166–183. ISSN: 1520-0434, 0882-8156. DOI: 10.1175/2010WAF2222451.1. URL: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/26/2/2010waf2222451\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/26/2/2010waf2222451_1.xml).
- Institut fédéral de recherches sur la forêt la neige et le paysage WSL, . (2016). *Simulation du développement du typographe en Suisse*. Bostryche. URL: <https://borkenkaefer.wsl.ch/fr/s-1/>.
- Institut National de l’information Géographique et Forestière (IGN), . (2022). *Inventaire forestier national - Mémento*. URL: [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento\\_2022.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2022.pdf).
- Institut Royal Météorologique de Belgique, . (Jan. 20, 2023). *Weather model INCA*. geo.be Metadata Catalog. URL: [https://publish.geo.be/geonetwork/srv/api/records/RMI\\_DATASET\\_INCA](https://publish.geo.be/geonetwork/srv/api/records/RMI_DATASET_INCA).
- Jakoby, O. et al. (2016). “3.9 Les scolytes et la sensibilité de l’épicéa aux infestations dans le contexte des changements climatiques”. In: *Forêts et changements climatiques. Éléments pour des stratégies d’adaptation*, pp. 251–268. URL: [https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10639/datastream/PDF/Jakoby-2016-Les\\_scolytes\\_et\\_la\\_sensibilit%C3%A9.pdf](https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10639/datastream/PDF/Jakoby-2016-Les_scolytes_et_la_sensibilit%C3%A9.pdf).
- Jönsson, A. M. et al. (Dec. 15, 2012). Guess the impact of *Ips typographus*—An ecosystem modelling approach for simulating spruce bark beetle outbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology* 166-167, pp. 188–200. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.012. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192312002468>.
- Météo France, . (2024). *Les modèles de prévision - Tempêtes en France métropolitaine*. URL: <http://tempetes.meteo.fr/Les-modeles-de-prevision.html>.
- Nageleisen, L.-M. and Grégoire, J.-C. (June 14, 2022). Une vie de typographe : point des connaissances sur la biologie d’*Ips typographus* (Linnaeus 1758). *Revue forestière française* 73.4. Number: 4, pp. 479–498. ISSN: 1951-6827. DOI: 10.20870/revforfr.2021.5565. URL: <https://revueforestierefrancaise.agroparistech.fr/article/view/5565>.
- Observatoire des forêts françaises, . (June 7, 2023a). *La santé des forêts se dégrade*. Observatoire des forêts françaises. URL: <https://foret.ign.fr/>.
- Observatoire des forêts françaises, . (June 7, 2023b). *Principaux problèmes sanitaires actuels en forêts*. URL: <https://foret.ign.fr/>.
- Office national des forêts, . (Nov. 16, 2023a). *En forêt, la crise des scolytes s’accélère partout en France*. Office national des forêts. URL: <https://www.onf.fr/onf/+/%E0::epidemie-de-scolytes-les-forestiers-de-lonf-sur-le-front.html>.
- Office national des forêts, . (Oct. 27, 2023b). *Les secondes vies du bois scolyté*. Office national des forêts. URL: <https://www.onf.fr/onf/+/%1C6E::les-secondes-vies-du-bois-scolyte.html>.
- Ogris, N. et al. (Oct. 15, 2019). RITY – A phenology model of *Ips typographus* as a tool for optimization of its monitoring. *Ecological Modelling* 410, p. 108775. ISSN: 0304-3800. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.108775. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380019302832>.

- Overbeck, M. and Schmidt, M. (Feb. 15, 2012). Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *Forest Ecology and Management* 266, pp. 115–125. ISSN: 0378-1127. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.11.011. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112711006876>.
- Roques, L. (2013). *Modèles de réaction-diffusion pour l'écologie spatiale: Avec exercices dirigés*. Publisher: Editions Quae. URL: <https://www.torrossa.com/gs/resourceProxy?an=5064084&publisher=FZZ759>.
- Saintonge, F.-X., Gillette, M. and Belouard, T. (Jan. 2023). *Crise scolytes sur épicéas, le bilan fin 2022*. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. URL: <https://agriculture.gouv.fr/crise-scolytes-sur-epiceas-le-bilan-fin-2022-20-millions-de-m3-soit-60-000-hectares>.
- Schebeck, M. et al. (2017). Diapause and overwintering of two spruce bark beetle species. *Physiological Entomology* 42.3. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/phen.12200>, pp. 200–210. ISSN: 1365-3032. DOI: 10.1111/phen.12200. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/phen.12200>.
- Van-Hyfte, S. (July 12, 2024). *Réunion sur les données ANASTASIA*. In collab. with Van-Hyfte, S.
- Wermelinger, B. and Seifert, M. (1998). Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology* 122.1, pp. 185–191. ISSN: 1439-0418. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1998.tb01482.x. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-0418.1998.tb01482.x>.

# Annexes

## A - Comparaison entre les anomalies FORDEAD et les sorties de RITYPY sur d'autres sous-polygones

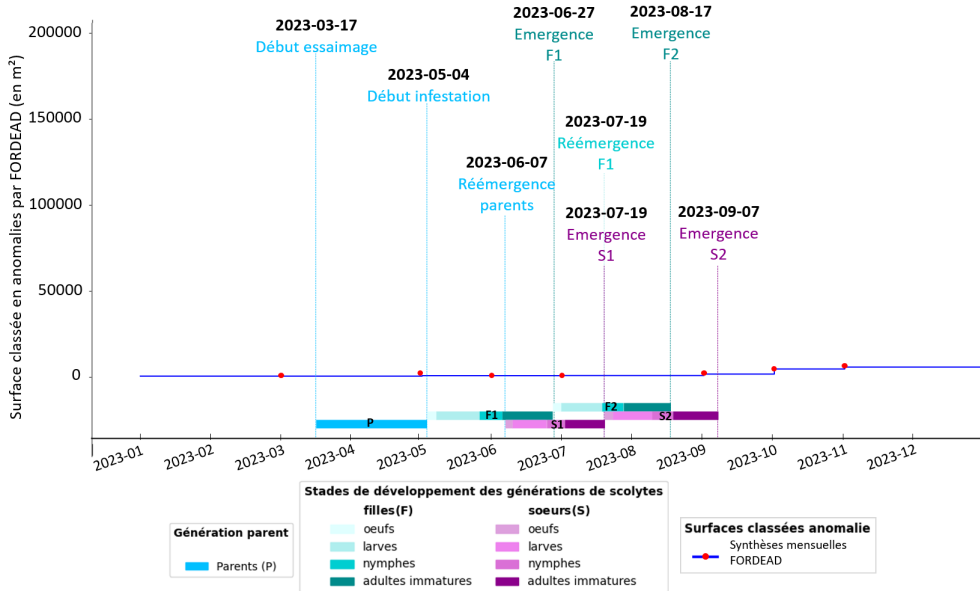


Figure 22: Comparaison entre l'évolution des surfaces classées en anomalies par FORDEAD et le développement des scolytes prédit par RITYPY pour l'année 2023 (sous-polygone 2)

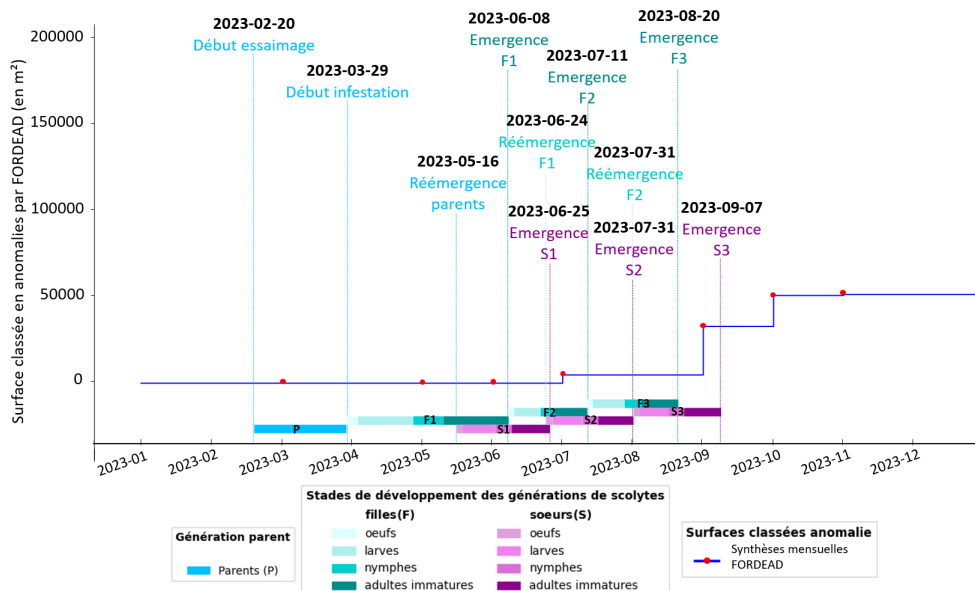


Figure 23: Comparaison entre l'évolution des surfaces classées en anomalies par FORDEAD et le développement des scolytes prédit par RITYPY pour l'année 2023 (sous-polygone 4)

## Résumé

Depuis 2018, les forêts d'épicéas de la région Grand-Est subissent d'importants dépérissements dus à la prolifération de scolytes typographes *Ips typographus*. Ces coléoptères se développent dans sous l'écorce des épicéas. Il est difficile de stopper l'infestation car les signes ne sont vraiment visibles que lorsque les jeunes scolytes sont déjà partis coloniser de nouveaux arbres. Devant l'importance de détecter les attaques au plus tôt, l'UMR TETIS a conçu une chaîne de télédétection permettant de repérer les foyers grâce à la détection d'anomalies dans le flux hydrique des arbres. Afin de mieux contextualiser cette détection, notre étude vise à développer un modèle phénologique permettant de comparer les sorties de FORDEAD à la biologie de l'insecte. Le modèle RITYPY a été développé selon la méthode du modèle RITY-2. Les simulations ont été réalisées sur la maille SENTINEL-2 32ULU pour 2023. Les sorties de RITYPY montrent une corrélation entre l'altitude et la vitesse de développement, ce qui est cohérent avec la biologie de l'insecte. Les comparaisons entre FORDEAD et RITYPY semblent montrer que les plus fortes augmentations d'anomalies correspondent aux périodes où le plus de générations se développent. Notre modèle semble donc pouvoir aider à mieux contextualiser ces anomalies. Des sorties de FORDEAD à une résolution temporelle plus fine permettrait de le confirmer. Les données de température utilisées pour les prévisions 2024 ne semblent pas assez fiable pour estimer correctement le développement des scolytes. Néanmoins, le modèle présente un intérêt dans l'identification des zones à surveiller et est facilement adaptable sur d'autres régions.

**Mots clés :** modèle phénologique, ravageurs, forêts, télédétection

## Abstract

Since 2018, spruce forests in the Grand-Est region have been suffering severe dieback caused by the proliferation of *Ips typographus* bark beetles. These beetles develop under the bark of spruce trees. Stopping the infestation is difficult, as the signs are only visible when the young bark beetles have already moved on to colonise new trees. Given the importance of detecting attacks as early as possible, the UMR TETIS has designed a remote sensing chain to detect outbreaks by detecting anomalies in the water flow of trees. In order to better contextualise this detection, our study aims to develop a phenological model to compare the outputs of FORDEAD with the biology of the insect. The RITYPY model was developed using the RITY-2 model method. Simulations were carried out on the SENTINEL-2 32ULU tile for 2023. The RITYPY outputs show a correlation between altitude and development speed, which is consistent with the insect's biology. Comparisons between FORDEAD and RITYPY seem to show that the greatest increases in anomalies correspond to the periods when the most generations are in development. Therefore, our model seems to be able to help to better contextualise these anomalies. Outputs from FORDEAD at a finer temporal resolution would enable us to confirm this. The temperature data used for the 2024 forecasts do not seem reliable enough to correctly estimate the development of bark beetles. Nevertheless, the model is useful for identifying areas to be monitored and is easily adaptable to other regions.

**Key words :** phenological model, pests, forests, remote sensing