

Titre :	Modélisation de la mortalité du sapin baumier dans les peuplements naturels en période d'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette
Auteur :	Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.
Date :	Septembre 2019

1. Contexte

Le sapin baumier (*Abies balsamea*) est l'une des principales essences de la forêt boréale mixte québécoise. Une grande proportion des usines de transformation du bois dépendent de cette essence, particulièrement dans l'est de la province. Lors d'une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE; *Choristoneura fumiferana*), le bois est récolté de manière « préventive » dans les peuplements susceptibles d'être très affectés par l'insecte et de subir une forte mortalité, afin d'éviter qu'il se perde. Cela nécessite d'évaluer le plus précisément possible la mortalité probable du sapin afin d'éviter une récolte hâtive dans des peuplements moins à risque.

Actuellement, la mortalité potentielle du sapin baumier dans un peuplement touché par la TBE est évaluée grâce à un outil empirique développé par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Cet outil est basé sur une cote de défoliation cumulée obtenue en superposant les résultats des survols aériens de la Direction de la protection des forêts (DPF), puis en additionnant des poids associés au degré de défoliation observé chaque année sur une aire donnée (3 classes : légère [1], modérée [2], grave [3]).

Le seuil retenu, pour juger qu'une épidémie de TBE atteint une certaine gravité ou envergure, est une cote de défoliation cumulée depuis le début de l'épidémie supérieure ou égale à 15 dans les peuplements où le sapin représente au moins 25 % de la surface terrière. Ce seuil pourrait être atteint, par exemple, après 5 ans de défoliations graves (5 ans × 3) ou après 8 ans de défoliations modérées (8 ans × 2).

Toutefois, dans la région du Bas-Saint-Laurent, des vérifications sur le terrain indiquent que plusieurs peuplements avec une cote de défoliation cumulée supérieure à 15 ne présentent pas de signes évidents de mortalité. Les intervenants de cette région demandent donc de revoir ce seuil, afin de mieux cibler les aires forestières qui pourraient être sujettes à une forte mortalité et de planifier adéquatement les récoltes préventives.

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence
© Gouvernement du Québec

2. Méthodologie

2.1. Données

Pour vérifier la validité du seuil actuel, nous avons utilisé les données de la DPF pour le projet du suivi des impacts de la TBE dans les peuplements naturels. Dans ce projet, les sites les plus touchés par l'épidémie de TBE, selon les informations par tesselles (unités de 60 km²) des survols aériens de défoliation, sont sélectionnés dans les strates forestières à dominance de sapin ou d'épinette blanche situées dans les tesselles ayant le plus grand nombre de défoliations annuelles graves. Trois placettes d'échantillonnage permanentes à rayon variable (prisme facteur 2) sont installées dans chaque tesselle. Ces dernières sont situées dans 3 régions : Saguenay–Lac-Saint-Jean (région 02, environ 50 tesselles), Côte-Nord (région 09, environ 100 tesselles) et Bas-Saint-Laurent (région 01, environ 100 tesselles). Les premières placettes ont été installées en 2012 dans la région 09, en 2014 dans la région 02 et en 2016 dans la région 01.

Lors de l'installation de chaque placette, tous les arbres de dimension marchande (dont le diamètre à hauteur de poitrine [DHP] est d'au moins 9,1 cm à 1,3 m du sol) ont été inventoriés, en notant leur essence et leur DHP et en leur attribuant un numéro. Des mesurages annuels se sont échelonnés de 2012 à 2018, pour un maximum de 7 mesurages dans les placettes de la région 09, de 5 mesurages dans celles de la région 02 et de 3 mesurages dans celles de la région 01. Lors de chaque remesurage, l'état de chaque arbre et le pourcentage de défoliation (évaluation visuelle par classe de 5 %) de chaque sapin étaient notés. Les codes d'état utilisés sont : V (vivant), PM (presque mort, défoliation 99 %), MC (mort par TBE confirmée), AM (mort autre que TBE) et C (chicot).

Lors de la préparation des données pour les analyses, nous avons ignoré tous les mesurages des arbres à l'état de chicots notés au premier mesurage (355 arbres). Nous avons vérifié le code d'essence pour un même arbre ainsi que la séquence de ses états. La surface terrière de chaque essence par code d'état a été compilée pour chacune des placettes. Nous avons regroupé le mélèze avec le pin gris, étant donné sa fréquence peu élevée, de même que l'épinette rouge, presque absente, avec l'épinette noire. Les essences feuillues et le thuya ont été regroupés sous « autres essences » (AUT).

Pour chaque placette, nous avons calculé la surface terrière du groupe SEPM (sapins, épinettes, pin gris et mélèzes), la proportion de la surface terrière totale représentée par ce groupe, la proportion de la surface terrière du groupe SEPM représentée par le sapin, la proportion de la surface terrière du groupe SEPM composée d'arbres morts (états MC, AM et C), de même que le pourcentage moyen de défoliation des sapins. L'âge du peuplement est celui apparaissant sur la carte écoforestière de la Direction des inventaires forestiers (MFFP 2015).

Nous avons associé à chaque placette les classes de défoliation annuelle observées lors des relevés aériens. Selon les premières défoliations notées dans ces relevés, le début de l'épidémie était en 2007

pour la région 09, en 2009 pour la région 02 et en 2014 pour la région 01 (année où plus de 5 % des placettes avaient une classe de défoliation). Les placettes ont donc été installées 5 ans après le début de l'épidémie dans les régions 02 et 09 et 2 ans après le début dans la région 01. Après avoir compilé les fréquences des défoliations cotées « légères », « modérées » et « graves » pour chaque placette du début de l'épidémie jusqu'à l'année du mesurage, nous avons attribué un poids de 1 aux défoliations légères, de 2 aux défoliations modérées et de 3 aux défoliations graves, puis calculé la somme pour obtenir une cote de défoliation cumulée pour chaque placette à chacun des mesurages.

2.2. Analyse

À l'aide d'une analyse descriptive, nous avons exploré les liens entre les classes de défoliation établies par relevé aérien et le pourcentage observé de défoliation du sapin, de même qu'entre les classes de défoliation établies par relevé aérien et la proportion de la surface terrière du groupe SEPM composée d'arbres morts (ci-après désignée « proportion de SEPM mort »).

Ensuite, nous avons développé un modèle statistique reliant la proportion de SEPM mort aux classes de défoliation et aux caractéristiques du peuplement. Les variables testées étaient la proportion de sapin dans le groupe SEPM, la surface terrière totale pour l'ensemble des essences, la densité du sapin, le diamètre moyen quadratique du sapin, l'âge du peuplement, la fréquence des défoliations légères, modérées et graves depuis le début de l'épidémie, la cote de défoliation cumulée et le nombre d'années depuis le début de l'épidémie de TBE. Afin d'éviter des problèmes de multicolinéarité, nous avons retiré du modèle certaines variables explicatives fortement corrélées les unes avec les autres. Ainsi, le nombre d'années d'épidémie n'a pas été utilisé, car il était fortement corrélé à la cote de défoliation cumulée et au nombre de défoliations graves. De plus, comme la cote de défoliation cumulée était fortement corrélée à la fréquence des défoliations graves, nous avons testé ces deux variables séparément.

La variable réponse (proportion de SEPM mort) est limitée à des valeurs de 0 à 1 et ne suit donc pas une loi normale. Une régression linéaire standard n'est donc pas appropriée, puisqu'elle pourrait prédire des proportions négatives et des proportions plus grandes que 1. Nous avons testé plusieurs types de modèles pour tenir compte de la nature de la variable réponse :

- la régression logistique avec distribution binomiale (surface terrière de SEPM mort/surface terrière totale), dont la forme sigmoïdale pourrait bien s'ajuster aux données;
- la fonction logistique à 4 paramètres, pour tenir compte du fait que les proportions maximale et minimale n'atteignent pas nécessairement 1 et 0, respectivement. Ceci pourrait permettre de tenir compte du fait que la proportion maximale de mortalité que le peuplement peut atteindre dépend de la proportion de sapin dans le groupe SEPM.

Nous n'avons pas retenu la distribution beta, même si elle aussi est bornée par 0 et 1, car nos analyses préliminaires ont montré des résultats très semblables à ceux de la régression logistique.

Nous avons utilisé la procédure GLIMMIX du logiciel SAS/STAT (version 14.1, SAS Institute Inc. 2015, Cary, NC) pour ajuster les modèles, dans lesquels un effet aléatoire de placette était inclus pour tenir compte de la corrélation entre les observations répétées dans une même placette.

3. Résultats et discussion

3.1. Description des données

La distribution des arbres par essence et par code d'état est présentée au tableau 1. Le sapin est fortement majoritaire dans la base de données, tandis que le pin gris est très peu présent. Le pourcentage des arbres-mesures avec un code d'état mort (MC, AM, C) est de 17,4 %, et le sapin représente 90,8 % de cette mortalité.

Tableau 1. Nombre total d'arbres-mesures (densité au prisme transformée en densité dans 400 m²) par état et pour chaque essence dans l'ensemble des placettes.

État*	Essence†					Total
	SAB	EPN	EPB	PIG	AUT	
V	59 385	21 721	4 958	133	8 171	94 368
PM	6 755	231	15	0	0	7 001
MC	18 414	1 097	123	0	0	19 634
AM	765	475	22	3	51	1 316
C	235	63	9	0	133	440
Total	85 554	23 587	5 127	136	8 355	122 759

* V : vivant; PM : presque mort (défoliation 99 %); MC : mort par TBE confirmée; AM : mort autre que TBE; C : chicot.

† SAB : sapin baumier; EPN : épinette noire; EPB : épinette blanche; PIG : pin gris; AUT : autres essences.

On ne trouve aucune mortalité confirmée par TBE (MC) parmi les sapins et les épinettes dans la région 01 (tableau 2). Par contraste, ce pourcentage est de 30 % dans la région 02 et de 19 % dans la région 09. Rappelons que les placettes ont été installées 5 ans après le début de l'épidémie dans les régions 02 et 09 avec un suivi de 5 et de 7 ans, respectivement, mais seulement 2 ans après le début de l'épidémie dans la région 01 avec un suivi de 3 ans.

En moyenne, les peuplements échantillonnés dans les régions 01 et 02 ont 45 ans, tandis que ceux dans la région 09 ont 62 ans (tableau 3). Leur surface terrière moyenne est d'environ 37 m²/ha dans la région 01 et d'environ 28 m²/ha dans les 2 autres régions.

La proportion de surface terrière totale représentée par le groupe SEPM (environ 0,90) est relativement semblable dans les 3 régions, tandis que la proportion que représente de sapin dans le groupe SEPM est de 0,7 dans la région 09 et d'environ 0,83 dans les 2 autres régions (tableau 4).

Tableau 2. Pourcentage des arbres-mesures par état, pour chaque essence, par région. Les codes des essences et des états sont définis au tableau 1.

État	Essence																	
	SAB			EPN			EPB			PIG			AUT			Toutes		
	01	02	09	01	02	09	01	02	09	01	02	09	01	02	09	01	02	09
V	99	49	56	94	95	91	100	92	81	-	97	100	97	98	98	98	60	72
PM	0	12	13	0	0	1	0	0	3	-	0	0	0	0	0	0	9	8
MC	0	39	30	0	3	5	0	7	15	-	0	0	0	0	0	0	30	19
AM	1	1	1	2	2	2	0	1	1	-	3	0	0	1	1	1	1	1
C	0	0	0	4	0	0	0	0	1	-	0	0	2	1	1	1	0	0

Tableau 3. Statistiques descriptives de l'âge des peuplements et de la surface terrière dans les placettes, par région.

Région	Nombre de placettes	Âge (ans)				Surface terrière (m ² /ha)			
		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
01	293	45	11	90	40	36,8	18,0	68,0	36,0
02	169	45	16	120	38	27,5	12,0	48,0	28,0
09	357	62	10	120	70	28,8	8,0	72,0	28,0
Toutes	819	53	10	120	50	31,4	8,0	72,0	30,0

Tableau 4. Statistiques descriptives par région de la proportion de la surface terrière totale représentée par le groupe SEPM dans les placettes et de la proportion de la surface terrière du groupe SEPM représentée par le sapin.

Région	Nombre de placettes	Proportion de la surface terrière totale représentée par le groupe SEPM				Proportion de la surface terrière du groupe SEPM représentée par le sapin			
		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
01	293	0,93	0,26	1,00	1,00	0,84	0,06	1,00	0,93
02	139	0,89	0,40	1,00	0,93	0,83	0,06	1,00	0,87
09	357	0,92	0,31	1,00	1,00	0,70	0,06	1,00	0,79
Toutes	819	0,92	0,26	1,00	1,00	0,77	0,06	1,00	0,86

La surface terrière des peuplements est dominée par le sapin baumier (SAB) et l'épinette blanche (EPB) dans la région 01 et par le SAB et l'épinette noire (EPN) dans les régions 02 et 09 (figure 1). On trouve les mêmes surfaces terrières en feuillus intolérants (FI) dans les 3 régions.

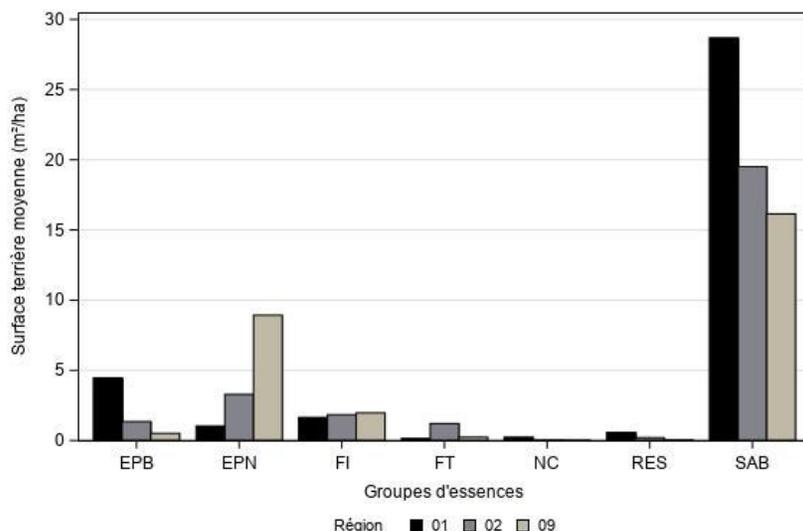


Figure 1. Surface terrière moyenne par essence dans les placettes analysées, par région (FI : feuillus intolérants; FT : feuillus tolérants; NC : essences non commerciales; RES : autres résineux. Les autres codes d'essences sont définis au tableau 1).

Selon les relevés aériens, on observe en moyenne de la défoliation dans les placettes depuis 3 ans dans la région 01, depuis 6 ans dans la région 02 et depuis 8 ans dans la région 09 (tableau 5). Il en résulte que les valeurs des cotes de défoliation cumulée sont beaucoup plus faibles dans la région 01 (moyenne de 7, maximum de 14) que dans les 2 autres régions (moyennes de 18 et de 20 et valeurs maximales de 24 et de 30 pour les régions 02 et 09, respectivement). L'épidémie de TBE sévit donc depuis moins longtemps dans la région du Bas-Saint-Laurent que dans les 2 autres régions étudiées. En moyenne, il y a eu 5 années de défoliations graves dans les régions 02 et 09, mais seulement une dans la région 01.

Tableau 5. Moyenne (minimum - maximum) et médiane (P_{50}) des caractéristiques de défoliation par relevé aérien des placettes.

Région	Nombre de placettes-mesure	Nombre d'années avec une classe de défoliation				Cote de défoliation cumulée*
		Légère	Modérée	Grave	Toutes	
01	660	0,8 (0 - 3) $P_{50} = 1$	1,1 (0 - 5) $P_{50} = 1$	1,3 (0 - 4) $P_{50} = 1$	3,2 (1 - 6) $P_{50} = 3$	7 (1 - 14) $P_{50} = 7$
02	516	0,2 (0 - 3) $P_{50} = 0$	0,7 (0 - 4) $P_{50} = 0$	5,4 (0 - 8) $P_{50} = 6$	6,3 (0 - 9) $P_{50} = 7$	18 (0 - 24) $P_{50} = 19$
09	850	0,7 (0 - 4) $P_{50} = 1$	1,8 (0 - 8) $P_{50} = 1$	5,2 (0 - 9) $P_{50} = 5$	7,6 (3 - 12) $P_{50} = 7$	20 (4 - 30) $P_{50} = 20$
Toutes	2026	0,6 (0 - 4) $P_{50} = 0$	1,3 (0 - 8) $P_{50} = 1$	4,0 (0 - 9) $P_{50} = 4$	5,8 (0 - 12) $P_{50} = 6$	15 (0 - 30) $P_{50} = 16$

* Somme des cotes calculée après avoir attribué un poids de 1 aux défoliations légères, de 2 aux défoliations modérées et de 3 aux défoliations graves.

Depuis le début de l'épidémie, l'évolution du pourcentage des placettes dans lesquelles aucune classe de défoliation n'est observée est relativement semblable dans les régions 01 et 09 (figure 2, classe de défoliation = aucune). Par contre, l'évolution du pourcentage des placettes avec une classe de défoliation légère, modérée ou grave semble différer entre la région 01 et les deux autres régions (figure 2). Après 4 ans d'épidémie, on observe, dans la région 01, un plus grand pourcentage de placettes avec une classe de défoliation légère ou modérée que dans les régions 02 et 09, et un pourcentage moins grand de placettes avec une classe de défoliation grave.

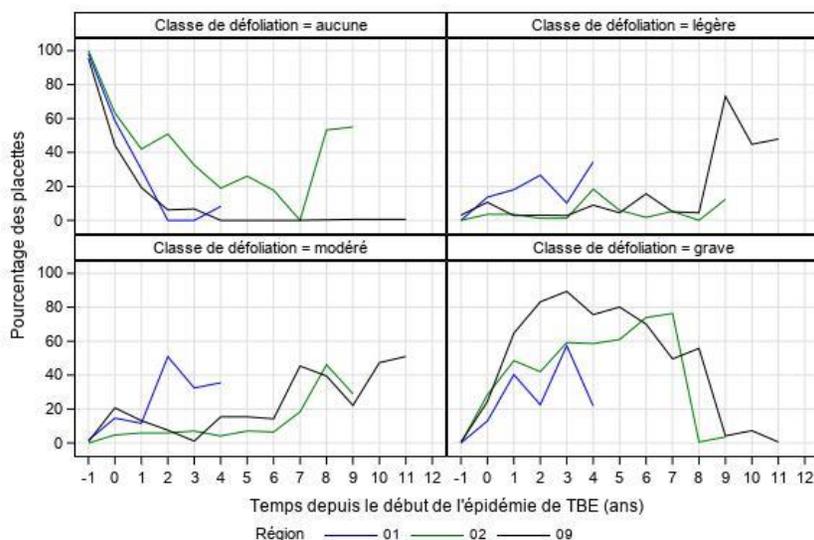


Figure 2. Évolution par région du pourcentage des placettes dans chacune des classes de défoliation en fonction du nombre d'années depuis le début de l'épidémie (début de l'épidémie déterminé par l'année où plus de 5 % des placettes ont une classe de défoliation légère, modérée ou grave).

La proportion de la surface terrière de sapin constituée d'arbres morts, la proportion de la surface terrière en SEPM constituée d'arbres morts, ainsi que le pourcentage de défoliation du sapin sont tous nettement plus grands dans les régions 02 et 09 et que dans la région 01 (tableau 6).

Tableau 6. Moyenne (minimum et maximum) et médiane (P_{50}) des caractéristiques de mortalité et de défoliation dans les placettes par région.

Région	Nombre de placettes-mesures	Proportion de la surface terrière de sapin constituée d'arbres morts	Proportion de la surface terrière en SEPM constituée d'arbres morts	Pourcentage de défoliation observé sur le sapin (%)
01	660	0,01 (0,00 - 0,33) $P_{50} = 0,00$	0,01 (0,00 - 0,29) $P_{50} = 0,00$	15,2 (0,3 - 65,0) $P_{50} = 12,9$
02	516	0,37 (0,00 - 1,00) $P_{50} = 0,20$	0,31 (0,00 - 1,00) $P_{50} = 0,17$	78,6 (7,8 - 100) $P_{50} = 90,6$
09	850	0,30 (0,00 - 1,00) $P_{50} = 0,10$	0,23 (0,00 - 1,00) $P_{50} = 0,08$	80,0 (11,0 - 100) $P_{50} = 88,8$
Toutes	2026	0,22 (0,00 - 1,00) $P_{50} = 0,00$	0,18 (0,00 - 1,00) $P_{50} = 0,00$	58,5 (0,3 - 100) $P_{50} = 67,5$

3.2. Analyse descriptive du lien entre la cote de défoliation cumulée et le pourcentage de défoliation observé sur le sapin

La cote de défoliation cumulée est un indice développé de manière empirique qui correspond à la somme des cotes évaluées par relevé aérien, calculée après avoir attribué un poids de 1 aux défoliations légères, de 2 aux défoliations modérées et de 3 aux défoliations graves, pour une même placette depuis le début de l'épidémie jusqu'à l'année du mesurage. Le calcul de cet indice implique que le risque de mortalité après une défoliation cotée « grave » est 3 fois plus grand qu'après une défoliation cotée « légère », et 1,5 fois plus grand qu'après une défoliation cotée « modérée ». Pour explorer le lien entre cet indice et la défoliation du sapin observée directement dans les placettes, nous avons calculé le pourcentage de défoliation moyen du sapin pour toutes les placettes ayant une même cote de défoliation cumulée. La cote de défoliation cumulée semble assez bien reliée au pourcentage de défoliation moyenne du sapin dans les placettes lorsqu'on utilise l'ensemble des observations, sans tenir compte de la région (figure 3).

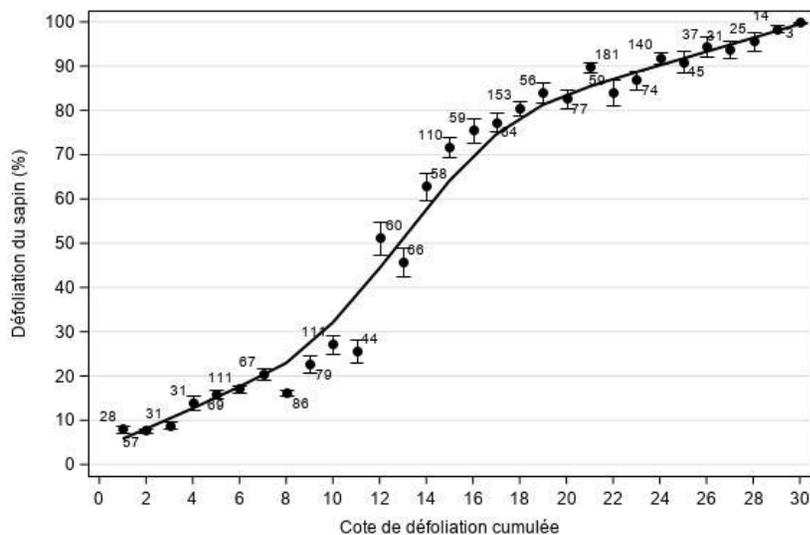


Figure 3. Pourcentage de défoliation du sapin calculé en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée, sans tenir compte de la région. La ligne noire représente la tendance moyenne. Le nombre d'observations ayant servi pour calculer la moyenne est inscrit à côté de chaque point.

Puisque le pourcentage de défoliation du sapin semble actuellement plus faible dans la région 01 (tableau 6), nous avons aussi examiné la relation entre la cote de défoliation cumulée et la défoliation moyenne du sapin en séparant les 3 régions (figure 4). On remarque que la pente semble moins forte pour la région 01.

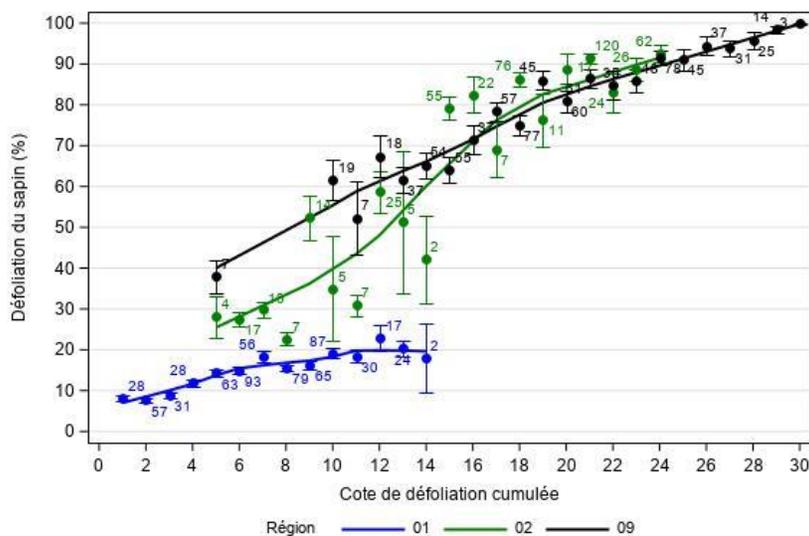


Figure 4. Pourcentage de défoliation du sapin, par région, calculé en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée. Les lignes représentent les tendances moyennes. Le nombre d'observations ayant servi pour calculer la moyenne est inscrit à côté de chaque point.

Des régressions logistiques par région reliant la cote de défoliation cumulée et le pourcentage de défoliation du sapin (figure 5) montrent que la pente de la région 02 est légèrement différente de celle de la région 09 ($t = -2,5$; $dl = 515$; $p = 0,0141$) et que la pente de la région 01 est plus faible que la pente moyenne des régions 02 et 09 ($t = -12,5$; $dl = 515$; $p < 0,0001$). Toutefois, la comparaison de la courbe de la région 01 à celles des régions 02 et 09 est peut-être biaisée par le fait que le faible nombre d'observations avec moins de 20 % de défoliation du sapin pour de faibles valeurs de cote de défoliation cumulée dans les régions 02 et 09 pourrait être causé par l'installation des placettes plusieurs années après le début de l'épidémie.

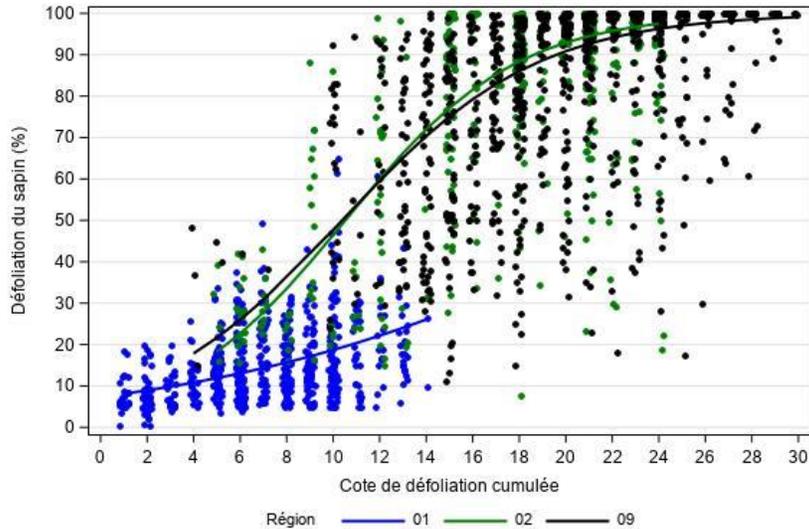


Figure 5. Modélisation par région, avec une régression logistique, du pourcentage de défoliation du sapin dans une placette en fonction de la cote de défoliation cumulée de cette placette depuis le début de l'épidémie. Chaque point représente la défoliation moyenne du sapin observée dans une placette lors d'un mesurage, et les lignes représentent les courbes modélisées par région.

Cependant, la cote de défoliation cumulée a le défaut de ne pas permettre de distinguer si une valeur élevée résulte de quelques années de défoliations graves ou plutôt de plusieurs années de défoliations légères ou modérées. Or, la figure 6a montre que le pourcentage observé de défoliation du sapin semble un peu plus grand, pour une même cote de défoliation cumulée, lorsque les défoliations graves sont plus fréquentes.

Une façon de contourner ce problème, tout en conservant un indice qui fait la somme de cotes de défoliation, est d'attribuer un poids plus grand aux classes correspondant à des défoliations plus graves. Une analyse préliminaire à l'aide d'une régression logistique multiple du pourcentage de défoliation du sapin en fonction de la fréquence des défoliations légères, modérées et graves montre les poids des classes de défoliation « grave » et « modérée » devraient être de 7 : 3, plutôt que les valeurs 3 : 2 utilisées dans l'indice actuel.

À la lumière de ces deux constats, nous avons donc calculé un nouvel indice en donnant des poids de 7, 3 et 1 aux classes de défoliation grave, modérée et légère, respectivement. Ce changement élimine presque complètement les différences entre les pourcentages moyens de défoliation du sapin lorsque le nombre de défoliations graves augmente pour une même valeur de cote de défoliation cumulée (figure 6b).

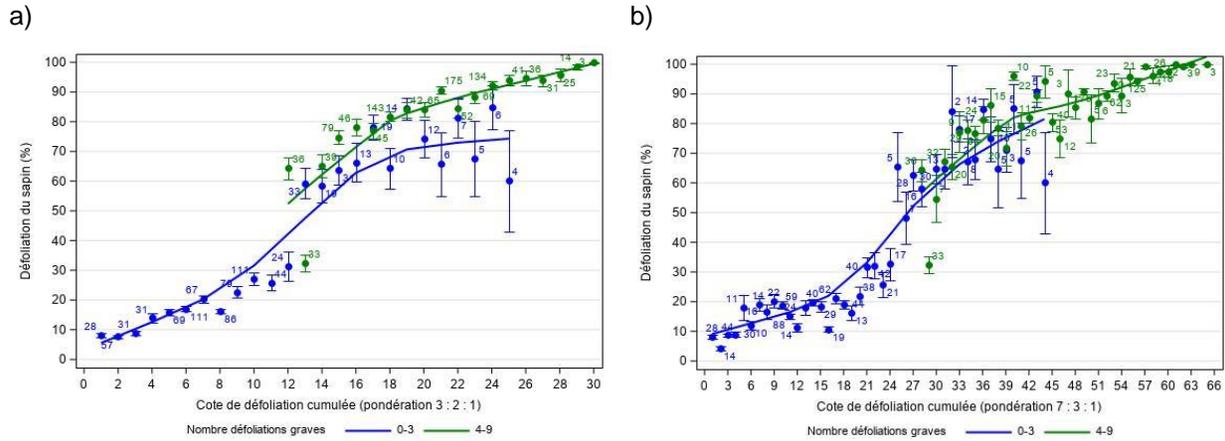


Figure 6. Pourcentage de défoliation du sapin calculé en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée pour un nombre donné de défoliations graves, avec des poids a) de 3 : 2 : 1 et b) de 7 : 3 : 1 attribués aux défoliations graves, modérées et légères, respectivement. Les lignes représentent les tendances moyennes. Le nombre d'observations ayant servi pour calculer la moyenne est inscrit à côté de chaque point.

Toutefois, lorsqu'on regarde les pourcentages moyens de défoliations des placettes par région, on remarque que la modification du poids des classes ne permet pas de tenir compte du caractère distinct de la région 01 (figure 7).

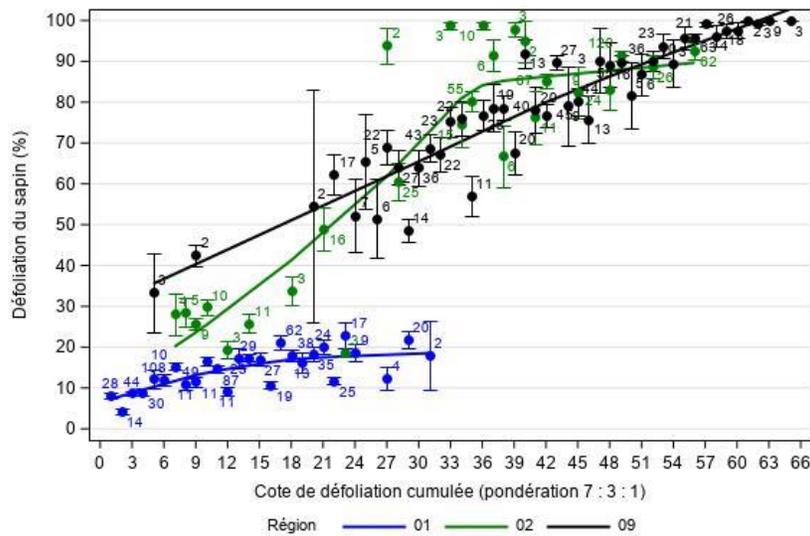


Figure 7. Pourcentage de défoliation du sapin par région, calculé en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée (pondération de 7 : 3 : 1 attribuée aux défoliations graves, modérées et légères, respectivement). Les lignes représentent les tendances moyennes. Le nombre d'observations ayant servi pour calculer la moyenne est inscrit à côté de chaque point.

Une autre façon de synthétiser la séquence de classes de défoliation dans chaque placette est de compter la fréquence de chacune des classes de défoliation depuis le début de l'épidémie. Par exemple, une

placette pourrait avoir une séquence comprenant 6 défoliations graves et 1 défoliation modérée. Pour explorer le lien entre la défoliation moyenne d'une placette et le nombre de défoliations graves et modérées dans une séquence, nous avons calculé le nombre moyen de placettes ayant le même nombre de défoliations graves et le même nombre de défoliations modérées. La figure 8 montre que le pourcentage moyen de défoliation observé dans les placettes semble augmenter avec le nombre de défoliations graves depuis le début de l'épidémie. De plus, ce pourcentage semble légèrement plus élevé, pour un même nombre de défoliations graves, s'il y a eu au moins deux défoliations modérées que s'il n'y en a eu qu'une seule ou aucune.

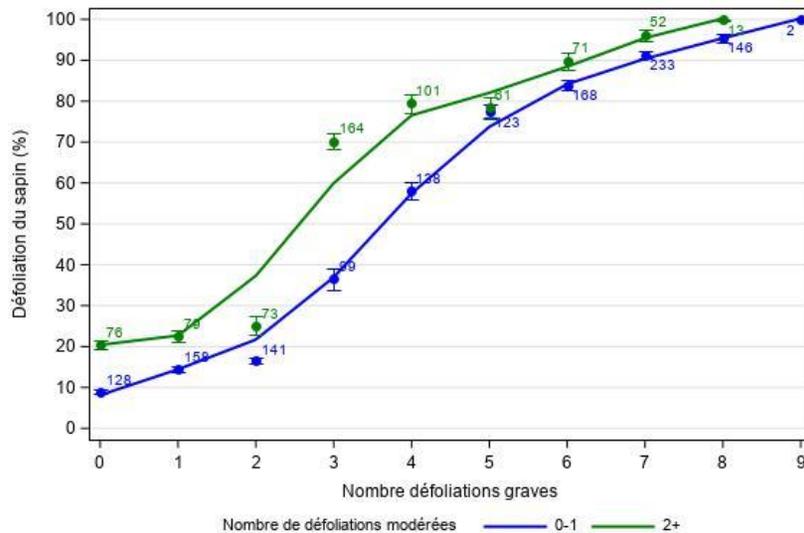


Figure 8. Pourcentage de défoliation du sapin calculé en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec un même nombre de défoliations graves, pour les placettes avec au plus 1 défoliation modérée (bleu) ou celles avec au moins 2 défoliations modérées (vert) depuis le début de l'épidémie. Le nombre d'observations ayant servi pour calculer la moyenne est inscrit au-dessus de chaque point.

Les trois approches présentées pour synthétiser la séquence de classes de défoliation associée à une placette, soit la cote de défoliation cumulée avec des poids 3 : 2 : 1, la cote de défoliation cumulée avec des poids 7 : 3 : 1 et le nombre de défoliations graves et modérées depuis le début de l'épidémie, donnent des résultats semblables dans une régression logistique, avec des coefficients de détermination (R^2) d'environ 0,76.

3.3. Analyse descriptive du lien entre la cote de défoliation cumulée et la proportion de SEPM mort

Toutes régions confondues, la proportion de SEPM mort augmente avec la cote de défoliation cumulée (figure 9a) et avec le nombre de défoliations graves depuis le début de l'épidémie (figure 9b).

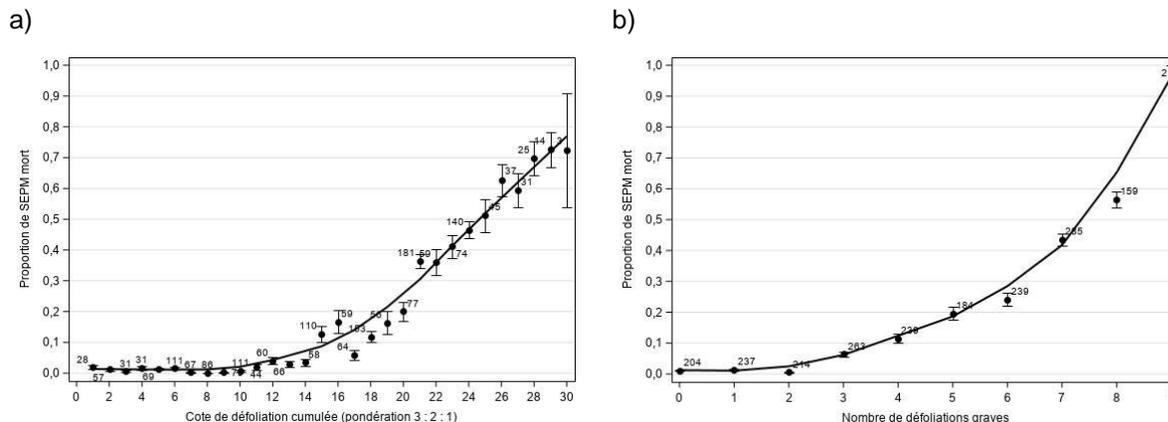


Figure 9. Proportion de SEPM mort calculée en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même valeur a) de cote de défoliation cumulée (pondération de 3 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement) et b) du nombre de défoliations graves, toutes régions confondues. Le nombre d'observations ayant servi pour calculer la moyenne est inscrit au-dessus de chaque point. Les lignes représentent les tendances moyennes.

Dans la région 01, la proportion de SEPM mort ne dépasse jamais 0,1, et aucune cote de défoliation cumulée (pondération de 3 : 2 : 1) supérieure à 15 n'est observée. Par contraste, dans les régions 02 et 09, la proportion de SEPM mort semble augmenter avec la cote de défoliation cumulée, et toutes deux atteignent des valeurs beaucoup plus élevées (figure 10).

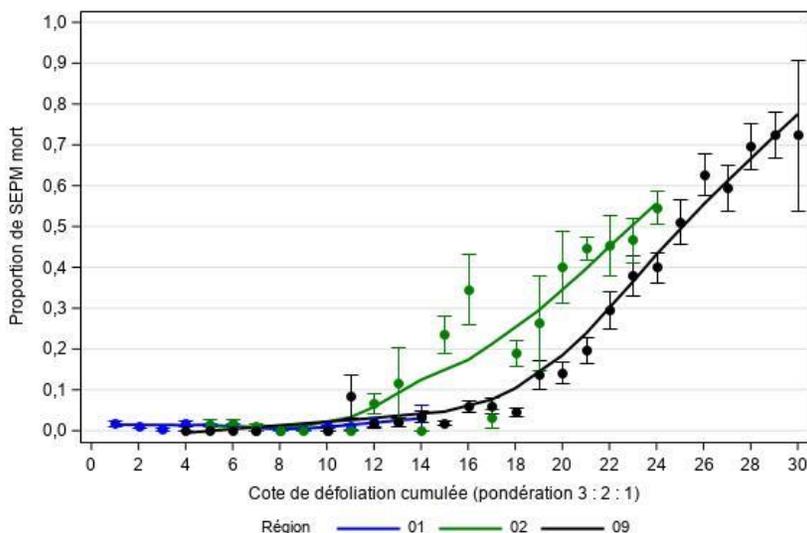


Figure 10. Proportion de SEPM mort dans chaque région calculée en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée (pondération de 3 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement). Les lignes représentent les tendances moyennes.

La cote de défoliation cumulée (pondération de 3 : 2 : 1) a le même défaut concernant la proportion de SEPM mort que pour le pourcentage de défoliation du sapin, c'est-à-dire qu'une même valeur peut correspondre à peu ou à beaucoup de défoliations graves (figure 11).

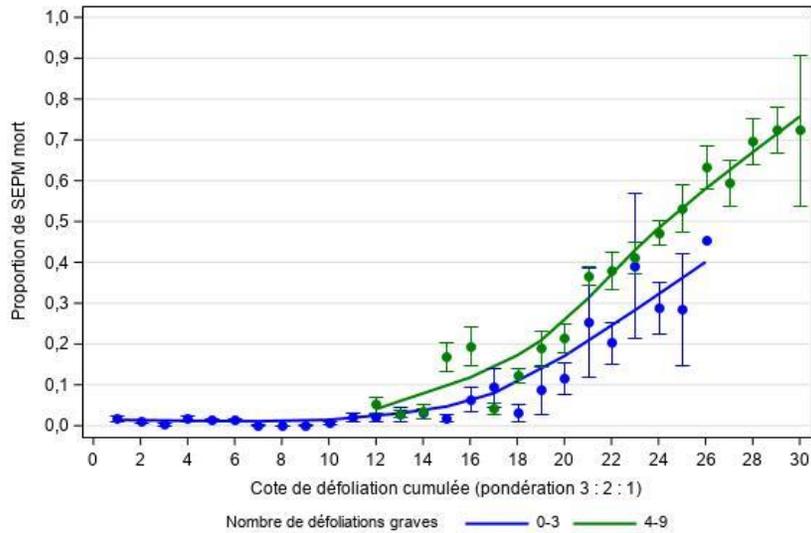


Figure 11. Proportion de SEPM mort calculée en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée (pondération de 3 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement), par classe de fréquence de défoliations graves. Les lignes représentent les tendances moyennes.

Une régression logistique reliant la fréquence des cotes de chaque catégorie à la proportion de SEPM mort suggère qu'une pondération de 4 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement, élimine presque complètement la différence de proportion de SEPM mort due à une plus grande fréquence de défoliations graves pour une même valeur de cote de défoliation cumulée (figure 12).

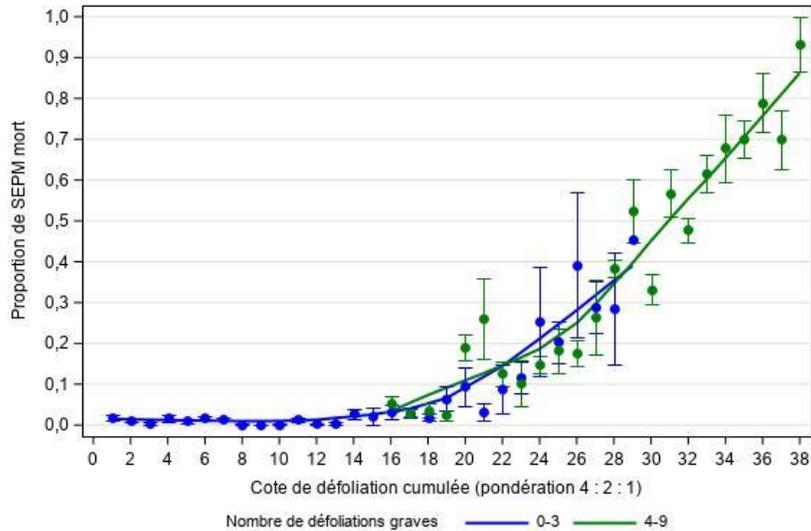


Figure 12. Proportion de SEPM mort calculée en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée (pondération de 4 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement), par classe de fréquence des défoliations graves. Les lignes sont les tendances moyennes.

Toutefois, cette nouvelle pondération ne permet pas de tenir compte des différences de mortalité du SEPM entre les régions (figure 13).

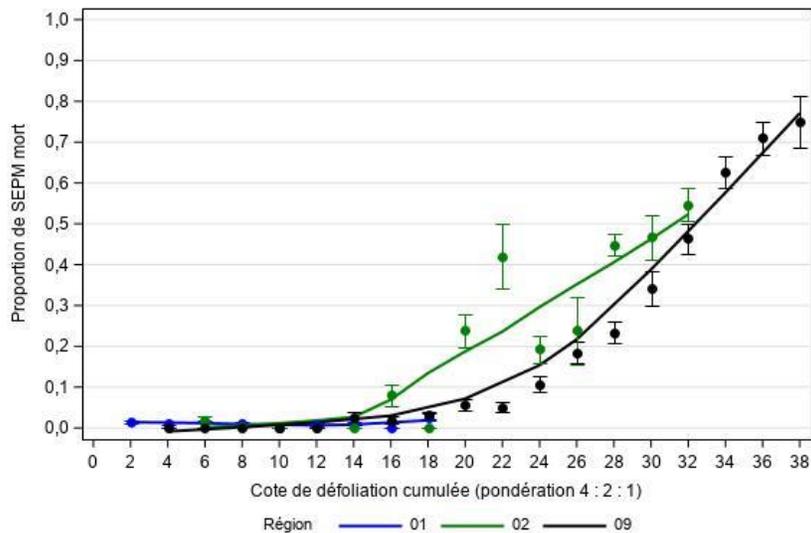


Figure 13. Proportion de SEPM mort par région, calculée en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée (pondération de 4 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement). Les lignes sont les tendances moyennes.

Le nombre de défoliations graves et modérées depuis le début de l'épidémie et la cote de défoliation cumulée avec la pondération 4 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement, semblent être des bons indicateurs de la proportion de SEPM mort dans les placettes et permettent de tenir compte des cas avec une plus grande fréquence de défoliations graves.

Par ailleurs, la proportion de sapin dans le groupe SEPM peut aussi influencer la proportion de SEPM mort. Il faudrait donc en tenir compte dans le modèle, afin de ne pas surestimer la mortalité dans les peuplements qui contiennent moins de sapin (figure 14).

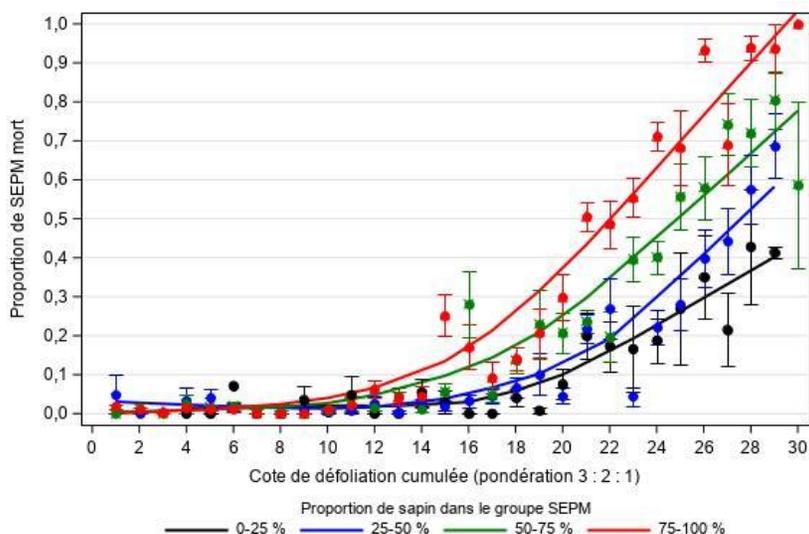


Figure 14. Proportion de SEPM mort calculée en faisant la moyenne (± 1 erreur type) des observations avec une même cote de défoliation cumulée (pondération de 3 : 2 : 1 pour les défoliations graves, modérées et légères, respectivement), selon la proportion de sapin dans le groupe SEPM. Les lignes représentent les tendances moyennes.

3.4. Modèle de prévision de la proportion de SEPM mort

Le meilleur type de modèle parmi ceux que nous avons testés est le modèle logistique avec distribution binomiale avec un effet aléatoire de placette. La qualité du modèle et le R^2 sont sensiblement les mêmes, que l'on utilise la fréquence des classes de défoliation, la cote de défoliation cumulée avec une pondération de 3 : 2 : 1 et la fréquence des défoliations modérées, ou bien la cote de défoliation cumulée avec une pondération de 4 : 2 : 1 et la fréquence des défoliations légères.

Nous présentons ci-dessous les résultats du modèle avec la fréquence des trois classes de défoliations. La seule variable explicative supplémentaire retenue est la proportion de sapin dans le groupe SEPM. Ce modèle a un R^2 de 0,532 et une erreur quadratique moyenne (*root mean square error*, ou RMSE) de 0,200. Une prévision de proportion de SEPM mort s'obtient avec les équations 1 et 2 et les paramètres du

tableau 7, où $prop_sab$ est la proportion de sapin dans le groupe SEPM, et $nb\text{cote}3$, $nb\text{cote}2$, $nb\text{cote}1$ sont respectivement la fréquence des défoliations graves, modérées et légères.

$$\text{logit} = \ln\left(\frac{prop_mort}{1-prop_mort}\right) = b_0 + b_1nb\text{cote}1 + b_2nb\text{cote}2 + b_3nb\text{cote}3 + b_4prop_sab \quad (\text{Éq.1})$$

$$p_mort = \frac{\exp(\text{logit})}{1+\exp(\text{logit})} \quad (\text{Éq.2})$$

Tableau 7. Paramètres du modèle logistique pour prévoir la proportion de SEPM mort.

Paramètre	Variable associée au paramètre	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté	Valeur de t	Valeur de ρ
b_0	Ordonnée à l'origine	-8,5939	0,2637	818	-32,6	< 0,0001
b_1	$nb\text{cote}1$	0,3207	0,0636	1203	5,0	< 0,0001
b_2	$nb\text{cote}2$	0,4662	0,0316	1203	14,7	< 0,0001
b_3	$nb\text{cote}3$	0,8686	0,0279	1203	31,2	< 0,0001
b_4	$prop_sab$	2,3301	0,1709	1203	13,6	< 0,0001

La fréquence des défoliations graves explique 38,7 % de la variabilité de la proportion de SEPM mort; celle des défoliations modérées ajoute 6,8 %, et celle des défoliations légères ajoute 0,5 %. La proportion de sapin dans le groupe SEPM explique un autre 7,2 % de la variabilité. Selon la valeur des paramètres b_2 et b_3 , le poids des défoliations graves est près de 2 fois plus grand que celui des défoliations modérées.

Toutes régions confondues, le modèle est sans biais, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'erreur systématique en fonction de la fréquence des défoliations graves ou de la proportion de sapin dans le groupe SEPM (figure 15).

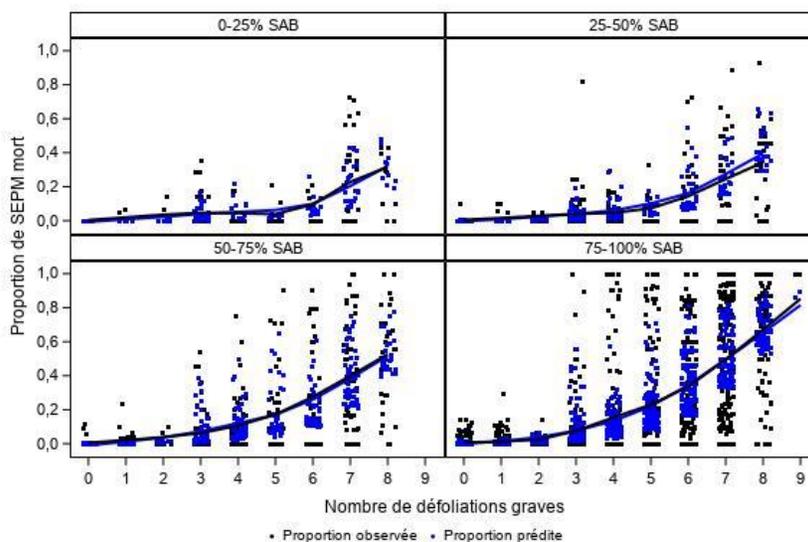


Figure 15. Proportions observée et prédite de SEPM mort en fonction de la fréquence des défoliations graves, selon la proportion du sapin au sein du groupe SEPM. Les lignes sont les tendances moyennes.

En général, le biais est assez faible pour les régions 01 et 09, mais le modèle sous-estime la mortalité dans la région 02 (figure 16). D'ailleurs, lorsqu'on ajoute la région dans le modèle, son effet est significatif et explique 2,6 % de la variabilité.

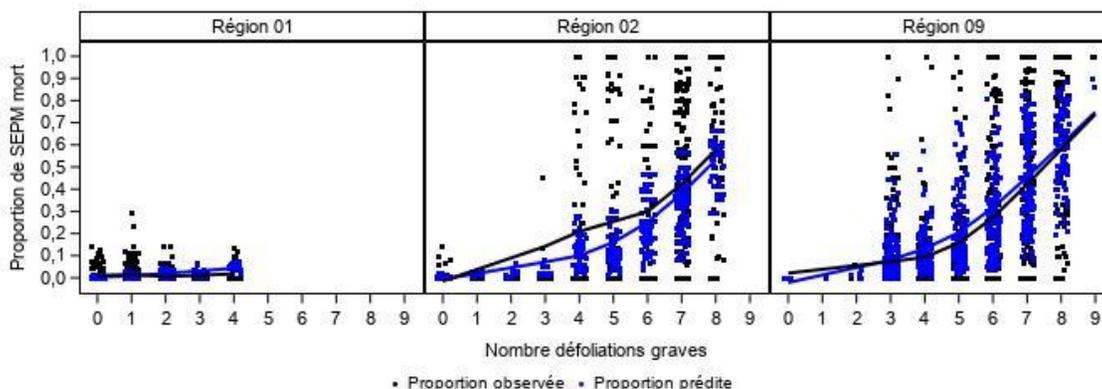


Figure 16. Proportions observée et prédite de SEPM mort en fonction de la fréquence des défoliations graves, par région. Les lignes sont les tendances moyennes.

La figure 17 présente l'effet des trois principales variables du modèle. Un grand nombre de défoliations graves augmente la proportion de SEPM mort, et la proportion prédite maximale de SEPM mort augmente avec la proportion de sapin dans le groupe SEPM. Pour une même fréquence de défoliations graves, une augmentation du nombre de défoliations modérées entraîne une plus grande proportion de SEPM mort.

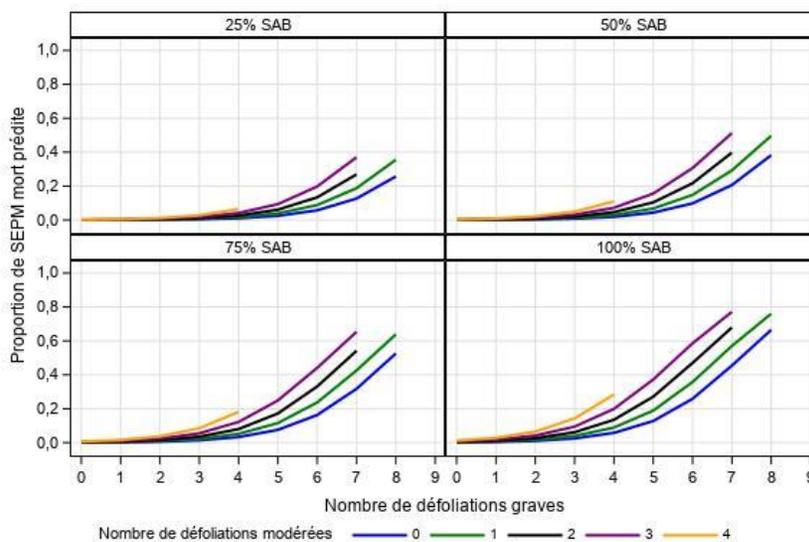


Figure 17. Proportion prédite de SEPM mort en fonction de la fréquence des défoliations graves, selon la proportion de sapin dans le groupe SEPM et la fréquence des défoliations modérées (le nombre des défoliations légères étant fixé à 0). Les courbes arrêtent aux valeurs maximales des variables explicatives observées dans la base de données.

La figure 18 présente l'effet de la fréquence des défoliations légères sur la proportion prédite de SEPM mort. Pour une même fréquence de défoliations graves, une augmentation du nombre de défoliations légères entraîne une plus grande proportion de SEPM mort.

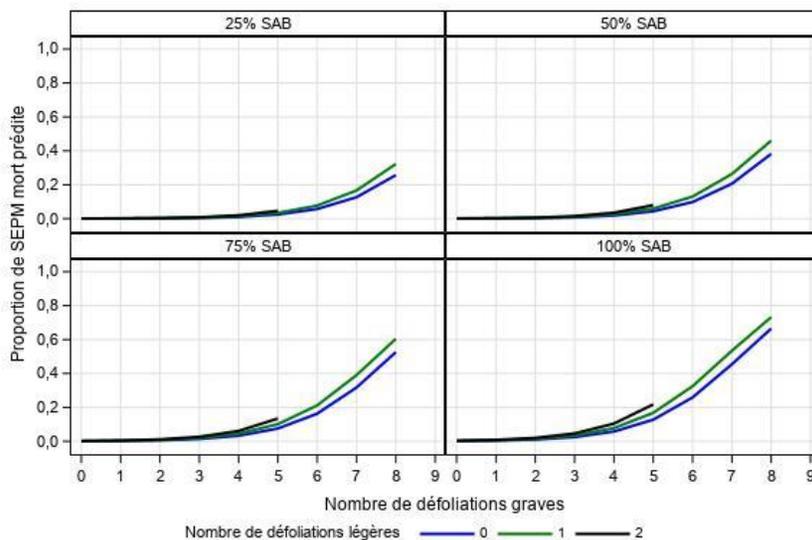


Figure 18. Proportion prédite de SEPM mort en fonction de la fréquence des défoliations graves, selon la proportion de sapin dans le groupe SEPM et la fréquence des défoliations légères (le nombre de défoliations modérées étant fixé à 0). Les courbes arrêtent aux valeurs maximales des variables explicatives observées dans la base de données.

Le modèle logistique ne permet pas d'utiliser l'équation au-delà de l'étendue observée des fréquences de défoliations de chaque catégorie, car ce type de modèle finira toujours par prédire 100 % de mortalité si on augmente assez le nombre de défoliations graves ou modérées. Ce comportement n'est probablement pas réaliste, surtout pour les cas où le sapin est moins présent dans le groupe SEPM. L'approche de modélisation avec la fonction logistique à quatre paramètres aurait pu permettre de contrôler l'asymptote maximale, mais les données ne montrent pas encore de stabilisation de la mortalité selon la proportion de sapin, ce qui le rend difficile à calibrer (figure 15). Le modèle logistique devrait donc être calibré chaque année avec l'ajout d'observations supplémentaires, particulièrement avec des valeurs élevées de fréquence de défoliation graves.

Puisque la mortalité observée dans les placettes de la région 01 est pratiquement nulle et que la défoliation du sapin en fonction des cotes de défoliation cumulée ne semble pas suivre les mêmes tendances que les régions 02 et 09 (figure 4), il n'est pas recommandé d'utiliser ce modèle pour prédire la proportion de SEPM mort dans la région 01. De plus, la sous-estimation de la mortalité dans la région 02 suggère qu'il serait préférable d'ajuster un modèle par région.

4. Conclusion et recommandations

Pour les régions 02 et 09, la cote de défoliation cumulée, peu importe la pondération, est un bon indicateur de la défoliation du sapin et de la proportion de SEPM mort. L'utilisation d'un poids plus grand que 3 pour les défoliations graves permet d'ajouter un peu de précision et de différencier les cas où une même cote de défoliation cumulée résulte d'un nombre variable de défoliations graves.

La relation entre le pourcentage de défoliation du SAB et la cote de défoliation cumulée semble être différente dans la région 01 par rapport à ce qui a été observé dans les régions 02 et 09, mais l'absence de suivi dès les premières années de l'épidémie dans les régions 02 et 09 nous empêche de conclure avec certitude. Par contre, l'épidémie de TBE est beaucoup moins avancée dans la région 01 que dans les deux autres, et on y observe encore très peu de mortalité. Il se pourrait donc qu'on doive revoir le seuil empirique (associé à une cote de défoliation cumulée de 15 ou plus) pour la région 01, mais pour le moment, il est trop tôt pour définir celui-ci avec certitude. Des données supplémentaires sont nécessaires pour y arriver. Nous recommandons donc de poursuivre le suivi des placettes et peut-être d'inclure des données provenant d'autres régions, comme la Gaspésie.

5. Remerciements

Nous remercions Marie-Claude Lambert et Mathieu Bouchard pour leurs commentaires sur une version préliminaire de ce document. Également, nos remerciements s'adressent à Denise Tousignant pour la révision linguistique et à Nathalie Langlois pour la mise en page du document.

6. Référence

[MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015. *Norme de stratification écoforestière du 4^e inventaire écoforestier du Québec méridional*. Direction des inventaires forestiers. 101 p.

[\[http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/norme-stratification.pdf\]](http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/norme-stratification.pdf)

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.
Service du soutien scientifique