

Titre :	Probabilités de mortalité des feuillus selon le classement de la priorité de récolte
Responsables :	François Guillemette, ing.f., M. Sc.
Collaboration :	Steve Bédard, ing.f., M. Sc. et Filip Havreljuk, ing.f., M. Sc.
Date :	Janvier 2015

1- Introduction

En 2005, le système de classement MSCR¹ des arbres feuillus a été implanté au Québec afin d'identifier l'ordre de priorité de récolte des tiges lors des coupes de jardinage (Boulet 2005, 2007). Ce système vise à reconnaître les arbres qui mourront ou se dégraderont avant une prochaine récolte, prévue de 15 à 25 ans plus tard. Cependant, l'efficacité de ce système de trier des arbres en catégories ayant des probabilités différentes de mortalité n'a pas encore été quantifiée de façon empirique et directe. En effet, une telle analyse nécessite des mesures récoltées dans des placettes permanentes où des arbres sont observés une première fois, puis de nouveau quelques années plus tard pour confirmer leur évolution. De telles relectures ont été amorcées en 2010, après une période de 5 ans, dans quelques dispositifs expérimentaux de la Direction de la recherche forestière (DRF). Ces données permettent d'apporter un premier éclairage sur la probabilité quinquennale de mortalité observée pour des arbres classés selon le système MSCR. En réponse à une demande de la Direction de l'aménagement des forêts publiques et privées (DAEF), le présent avis apporte de nouvelles connaissances sur les probabilités de mortalité des arbres en lien avec la classification MSCR.

2- Méthodologie

Les données d'évolution des arbres sur pied sont tirées de projets de recherche de la DRF sur les effets des coupes de jardinage et d'autres coupes partielles en peuplement feuillu ou mixte à dominance feuillue (MRN 2013, projets n^{os} 112310023 et 112310026). Une première estimation de la priorité de récolte (MSCR) et du pire défaut externe des arbres a été amorcée en 2005, puis les relectures après

¹ **M** : arbre voué à mourir d'ici 20 ans;
S : arbre en perdition, mais dont la survie n'est pas compromise d'ici 20 ans;
C : arbre défectueux à conserver, dont le bois marchand n'est pas menacé par la carie;
R : arbre en réserve, sain et vigoureux.

5 ans ont débuté en 2010. Près de la moitié des observations provient de placettes témoins, sans intervention, alors que l'autre moitié provient de placettes traitées par des coupes partielles réalisées de 0 à 20 années plus tôt. Aux fins de la présente analyse, seuls les arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine (dhp) de plus de 23,0 cm au début de la période de mesure ont été retenus, soit 4 999 érables à sucre, 1 762 bouleaux jaunes et 791 hêtres à grandes feuilles. Ces arbres sont situés dans 45 blocs expérimentaux répartis du Témiscamingue à la Gaspésie. Cependant, 3 endroits ont une plus grande concentration de blocs : la Forêt d'enseignement et de recherche Mousseau située à Sainte-Véronique dans les Laurentides (17 blocs), la station forestière de Duchesnay (8 blocs), située près de la ville de Québec, et enfin, la forêt de Gatineau (4 blocs), située au nord du Parc de la Gatineau.

L'analyse des variables expliquant des variations dans la probabilité de mortalité des arbres sur une période de 5 ans a été réalisée à l'aide de la procédure GLIMMIX de SAS 9.3, de manière à inclure les effets aléatoires des placettes. Dans un premier temps, les variables explicatives suivantes ont été soumises à l'analyse : l'essence, le dhp, le dhp au carré (dhp^2), la classe MSCR, les interactions entre les 4 variables précédentes, le traitement (coupe partielle ou aucune coupe), la température annuelle normale (moyenne de 30 ans, de 1971 à 2000 : de 1,76 à 3,97 °C), les précipitations annuelles normales (de 1 000 à 1 448 mm), la région écologique et l'épaisseur du dépôt de surface (de 20 à 101 cm). Les données de normales climatiques ont été calculées à l'aide du logiciel BioSIM, à partir de la position géographique de chaque placette (Régnière *et al.* 1995). Il est toutefois apparu que la procédure statistique ne trouvait pas toujours une solution (le modèle ne convergeait pas), en grande partie à cause du déséquilibre de la base de données, notamment l'absence d'observations de mortalité dans certaines classes d'essence ou de priorité de récolte. Dans un deuxième temps, la procédure a donc été simplifiée en scindant le jeu de données selon les 3 essences, ce qui permettait une analyse plus approfondie pour l'érable à sucre que pour le hêtre, par exemple. Dans un troisième temps, les classes MSCR ont été regroupées lorsque les tests de comparaisons multiples démontraient l'absence de différences significatives entre 2 classes, ou bien lorsque ce regroupement était nécessaire en raison de l'absence d'observations de mortalité dans une classe précise (cas de la classe C pour le hêtre). Le lecteur est invité à consulter Guillemette *et al.* (2008) pour obtenir plus de détails sur cette méthode d'analyse.

Finalement, des probabilités quinquennales de mortalité ont été calculées pour des groupes d'arbres ayant des défauts jugés suffisamment fréquents ($n > 49$) pour qu'on évalue s'ils appartenaient à la bonne classe de priorité de récolte. Cependant, cette information n'a pas été analysée en profondeur et n'a pas fait l'objet d'analyses statistiques, compte tenu du nombre limité d'observations et des objectifs de cet avis.

3- Résultats

3.1. Érable à sucre

Les différences de probabilité quinquennale de mortalité pour l'érable à sucre sont expliquées par la classe MSCR ($p < 0,0001$) et par la température annuelle normale ($p = 0,0027$, tableau 1, figure 1). Les classes C et R ont été fusionnées, vu l'absence d'une différence significative ($p = 0,8456$). Les températures les plus fraîches correspondent à des placettes situées dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune, alors que les températures les plus chaudes correspondent à des placettes situées dans le domaine de l'érablière à tilleul. La probabilité de mortalité des érables des classes C et R passe de 0,3 à 1,9 % selon la température annuelle normale, tandis qu'elle varie de 8,9 à 19,2 % pour les érables de la classe M selon ce même gradient de température. Un érable de la classe M a de 10 à 29 fois plus de risques de mourir qu'un arbre des classes C et R. Quant aux érables de la classe S, leur probabilité de mortalité se situe entre celle des 2 autres classes et varie de 1,5 à 5,8 % selon la température, ce qui représente des risques 3 à 5 fois plus grands de mourir que les arbres des classes C et R.

Tableau 1. Paramètres des modèles de probabilité quinquennale de mortalité.

Variable	Paramètre	Érable à sucre	Bouleau jaune	Hêtre à grandes feuilles
X	MSCR = M	1,1934	0,6879	1,3421
	MSCR = S	1,7398	1,4096	2,0906
	MSCR = C	2,0645	1,2840	2,0906
	MSCR = R	2,0645	1,6280	2,0906
Y	Temp. normale	-0,1733		
Z	dhp			-0,02478

Probabilité = $e^{(-e^{(\text{vecteur})})}$ où le vecteur = $X + Y \times \text{température} + Z \times \text{dhp}$

L'analyse plus détaillée de la mortalité associée aux 18 défauts ayant été observés au moins 50 fois sur l'érable à sucre montre qu'en général, les probabilités de mortalité associées à des défauts correspondent assez bien à celles des classes MSCR qui leur sont associées (Tableau 2). En effet, 11 des 13 défauts classés C ou R sont associés à une probabilité de mortalité de 0 à 2 %, comme le prédit en moyenne le modèle. Seuls les défauts HP01X et VP03X étaient associés à des probabilités de mortalité plus élevées. Toutefois, comme elles sont basées sur un nombre d'observations assez faible (53 et 61, respectivement), ces probabilités plus élevées peuvent être attribuables aux seuls effets du hasard. Les 3 défauts classés M, soit FE06A, NC07A et SP14A, sont associés à des probabilités de mortalité un peu plus faibles qu'attendu, soit de 2 à 4,5 % au lieu de plus de 9 % tel que prédit par le modèle. Cependant, ces 2 défauts correspondent à un faible nombre d'observations, et ils sont associés à une probabilité de mortalité plus élevée que la plupart des défauts associés aux classes C et R.

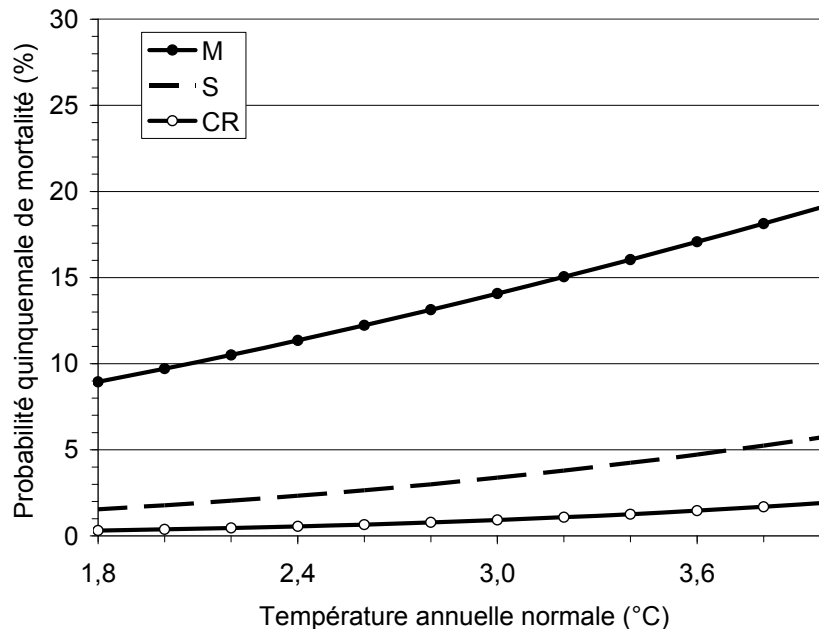


Figure 1. Probabilité quinquennale de mortalité de l'érable à sucre selon la classe de priorité de récolte et la température annuelle normale de la placette.

3.2. *Bouleau jaune*

Seule la classe de priorité de récolte explique des différences de probabilité quinquennale de mortalité chez le bouleau jaune ($p < 0,0001$, tableau 1, figure 2). Les bouleaux de la classe M ont une probabilité de mortalité de 13,68 %, laquelle est significativement supérieure à celle des 3 autres classes ($p \leq 0,0002$). Étonnamment, la probabilité de mortalité des bouleaux de la classe C est significativement différente de celle des bouleaux de la classe R ($p = 0,0171$). Elle semble aussi supérieure à celle des bouleaux de la classe S, même si cette dernière différence n'est pas significative ($p = 0,8621$). D'ailleurs, la probabilité de mortalité des bouleaux de la classe S ne diffère pas significativement de celle des bouleaux des classes C et R.

Encore une fois, l'analyse plus détaillée des 9 défauts ayant été observés au moins 50 fois chez le bouleau jaune apporte peu de nouvelles informations (Tableau 3). En effet, la mortalité est rare chez les bouleaux touchés par les 7 défauts des classes C ou R. Quant aux 2 défauts associés aux classes S ou M, le nombre d'observations est assez faible. Néanmoins, la probabilité de mortalité des bouleaux classés FE06A-M est faible (1,64 %), si l'on considère que la probabilité moyenne de mortalité des arbres de priorité M est de 13,68 %.

Tableau 2. Probabilité quinquennale de mortalité de l'érable à sucre selon le pire défaut observé. Seuls les défauts observés au moins 50 fois sont présentés.

Code de défaut	Description sommaire	Priorité	Nombre d'observations			Probabilité de mortalité
			Mort	Vivant	Total	
AR01X	Aucun défaut	R	2	463	465	0,43 %
DB05X	Blessure ≤ 1 face, sans carie	R	1	126	127	0,79 %
DB09X	Coude (déviation > rayon ou >20 degrés)	R	1	197	198	0,51 %
EN01X	Trou ou chicot inséré à angle aigu, < 10 cm	R	1	175	176	0,57 %
EN03X	Trou ou chicot inséré à angle aigu, > 20 cm	S	2	58	60	3,33 %
EN04X	Trou ou chicot inséré à angle aigu, 10-20 cm	C	0	119	119	0,00 %
FE02X	Fente ≤ 1,5 m, sans carie ni trou ≥ 10 cm	R	0	361	361	0,00 %
FE04X	Fente de fourche en « V » et fermée	C	0	138	138	0,00 %
FE06A	Fente > 1,5 m avec carie ou trou profond	M	7	156	163	4,29 %
FE06X	Fente > 1,5 m sans carie ni trou profond	C	1	96	97	1,03 %
FE13X	Gélivure récente > 1,5 m	R	3	162	165	1,82 %
HP01X	Branches mortes ou dépériées, 11 à 25 %	R	3	50	53	5,66 %
NC01X	Carie chancreuse, nécrose ≤ 1 face	S	2	165	167	1,20 %
NC07A	Chancre en cible, nécrose > 1 face, carie	M	2	100	102	1,96 %
PR01X	Cicatrice de pied ≤ 1 face, sans carie	R	1	97	98	1,02 %
SP14A	Sporophore de <i>Oxyporus p.</i> , haut. > 60 cm	M	7	148	155	4,52 %
VP01X	1 à 3 blessures ouvertes du perceur de l'érable	C	2	438	440	0,45 %
VP03X	Blessures saines et fermées du perceur	R	2	59	61	3,28 %

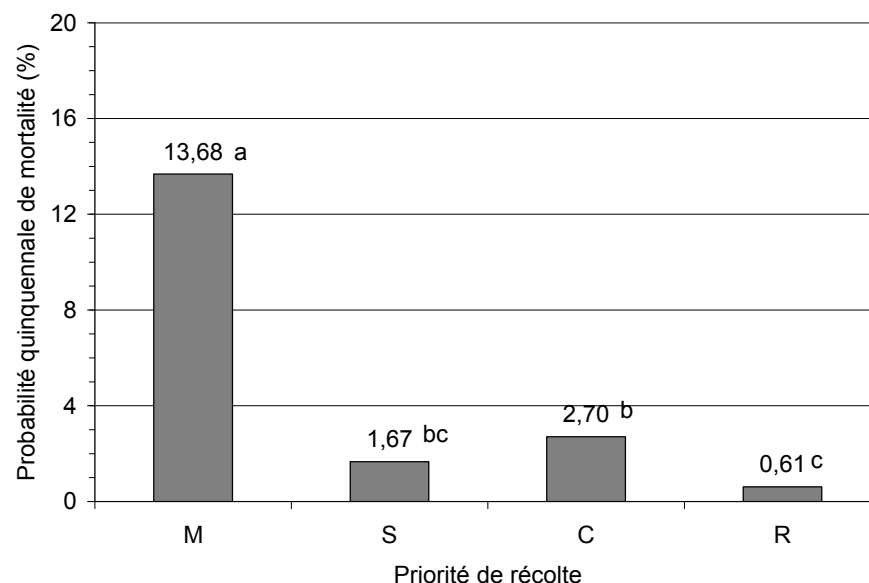


Figure 2. Probabilité quinquennale de mortalité du bouleau jaune selon la classe de priorité de récolte. Les différences significatives entre les classes sont montrées par des lettres différentes, à droite de la valeur.

Les défauts des arbres morts de la classe C ont été regardés afin d'identifier les causes probables de la mortalité qui s'est avérée plus élevée que prévu pour cette classe (Figure 2). Les seules pistes possibles sont les défauts HP11X (3 morts sur 26 observations, 11,5 %) et HP02X (2 morts sur 18 observations, 11,1 %), mais il est trop tôt pour tirer des conclusions avec aussi peu d'observations.

Tableau 3. Probabilité quinquennale de mortalité du bouleau jaune selon le pire défaut observé. Seuls les défauts observés au moins 50 fois sont présentés.

Code de défaut	Description sommaire	Priorité	Nombre d'observations			Probabilité de mortalité
			Mort	Vivant	Total	
AR01X	Aucun défaut	R	1	310	311	0,32 %
DB05X	Blessure ≤ 1 face, sans carie	R	0	52	52	0,00 %
DB08X	Broussin, groupe de brindilles adventives	R	0	60	60	0,00 %
DB09X	Coude (déviation > rayon ou > 20 degrés)	R	0	68	68	0,00 %
EN01X	Trou ou chicot inséré à angle aigu, < 10 cm	R	1	94	95	1,05 %
EN03X	Trou ou chicot inséré à angle aigu, > 20 cm	S	0	51	51	0,00 %
EN04X	Trou ou chicot inséré à angle aigu, 10-20 cm	C	0	65	65	0,00 %
FE02X	Fente ≤ 1,5 m, sans carie ni trou ≥ 10 cm	R	2	157	159	1,26 %
FE06A	Fente > 1,5 m avec carie ou trou profond	M	1	60	61	1,64 %

3.3. Hêtre à grandes feuilles

Pour le hêtre à grandes feuilles, la probabilité de mortalité est expliquée par la classe de priorité de récolte ($p < 0,0001$) et par le dhp ($p = 0,0008$, tableau 1, figure 3). Les classes C et R ont été regroupées pour résoudre le problème de modélisation que posait l'absence de mortalité du hêtre pour la classe C. Par la suite, la classe S a été regroupée avec les classes C et R, vu l'absence d'une différence significative ($p = 0,3835$), laquelle est possiblement attribuable à un échantillonnage insuffisant des hêtres des classes C et R (87 et 144, respectivement) pour qu'on puisse détecter une différence entre les classes. La probabilité de mortalité sur 5 ans des hêtres de la classe M varie de 12,1 à 33 % selon le dhp, soit 3 à 10 fois plus que celle des hêtres des classes S, C et R (Figure 3). Un hêtre ayant un dhp de près de 50 cm et appartenant à la classe S, C ou R a presque la même probabilité de mortalité qu'un hêtre ayant un dhp de 24 cm, mais appartenant à la classe M.

Seuls 2 défauts de la classe S, FE06E et FE13E², ont été observés au moins 50 fois. Ils sont associés à des probabilités de mortalité respectives de 5,66 % (3 morts sur 53) et de 1,90 % (2 morts sur 105). Dans ces 2 cas, les probabilités de mortalité sont semblables à celles calculées pour la classe regroupée SCR (Figure 3).

² FE06E : fente > 1,5 m sans carie ni trou profond. FE13E : gélivure récente > 1,5 m.

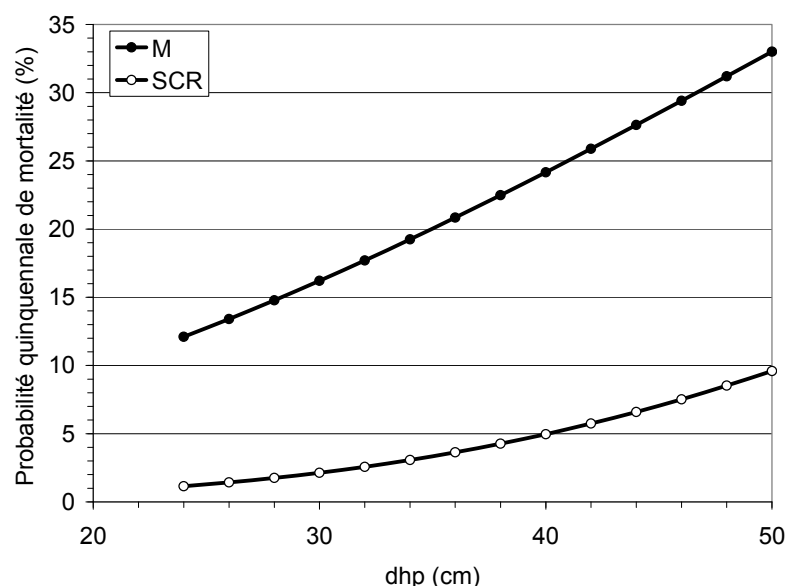


Figure 3. Probabilité quinquennale de mortalité du hêtre à grandes feuilles selon la classe de priorité de récolte et le dhp.

4- Discussion

Ces premiers résultats montrent que la classe de priorité M permet d'identifier les arbres ayant une probabilité de mortalité quinquennale nettement plus élevée que les autres (Figures 1 à 3). Cependant, l'échantillonnage et la durée des observations ne permettent pas de cibler de façon incontestable des défauts devant être associés à une autre classe de priorité de récolte. Le nombre de cas possibles est très élevé.

Parvenir à mieux classer chaque défaut nécessiterait un plan d'échantillonnage propre à cet objectif. Or, un tel plan exigerait beaucoup de ressources sur une longue période, car il faudrait échantillonner plus d'une centaine d'arbres par défaut. Dans les cas montrés, si un défaut a été observé seulement 50 fois, alors sa probabilité de mortalité sera un multiple de 2 %. Ainsi, une différence de 2 ou 4 % de mortalité (1 ou 2 arbres) pourrait être attribuable au seul effet du hasard. Il faut aussi prendre en compte que le fait d'associer certains des défauts à des classes différentes de priorité de récolte n'est pas souhaitable dans les projets de recherche ou d'inventaire permanent, puisqu'il ne serait pas toujours possible de corriger les anciens classements avec un nouveau tri. Cela aurait pour effet d'annuler des années d'efforts d'acquisition de nouvelles connaissances.

Au mesurage de 10 ans, il faut s'attendre à observer une réduction des écarts dans les probabilités de mortalité entre les classes de priorité de récolte, comparativement aux résultats de 5 ans présentés ici. D'un côté, la probabilité de mortalité des arbres classés C ou R va augmenter (qu'elle soit calculée sur

une base annuelle ou quinquennale), en raison du fait qu'une partie d'entre eux est passée de cette classe à la classe S ou M au cours de la première période quinquennale (données non publiées). D'un autre côté, certains arbres pourraient être classés M à cause d'un défaut, mais avoir une probabilité de mortalité beaucoup plus faible que la moyenne des arbres de la classe M. Ainsi, à mesure que les arbres ayant les pires défauts meurent, la probabilité de mortalité des arbres résiduels de cette classe pourrait diminuer. Par le fait même, la probabilité de mortalité des arbres de la classe M pourrait diminuer d'une période (annuelle ou quinquennale) à l'autre. Avec les données actuelles, la meilleure façon de projeter à plus long terme les probabilités de mortalité selon les classes MSCR serait d'inclure dans l'analyse un modèle empirique de changement de classe des arbres. Cet exercice sera possible avec le projet de mise à jour du simulateur SaMARE, dans le cadre du Chantier sur la forêt feuillue, qui prévoit calibrer un tel modèle de changement de classe MSCR.

Hartmann *et al.* (2008) avaient évalué la capacité des classes MSCR à prédire la probabilité de mortalité de l'érable à sucre au Témiscamingue à partir de données rétrospectives d'accroissement. Ils ont posé l'hypothèse que les arbres les plus susceptibles de mourir devraient afficher une baisse de croissance au cours des années précédentes. Comme dans la présente étude, ils ont observé certaines différences significatives entre les arbres de la classe M et ceux de la classe R, mais pas entre ceux des classes S, C et R. Leur méthode ne permettait pas de considérer le risque de mortalité de l'arbre à cause d'une diminution de sa résistance mécanique face à des épisodes climatiques comme les rafales de vent ou le verglas.

Fortin *et al.* (2008) avaient estimé les probabilités quinquennales de mortalité de l'érable à sucre, du bouleau jaune et du hêtre à grandes feuilles selon les classes MSCR. Leur méthode consistait à établir des correspondances entre les classes MSCR et celles de vigueur (1-2-3-4), puis à faire des simulations à partir des modèles de mortalité obtenus avec les classes de vigueur. Pour l'érable à sucre et le bouleau jaune ayant un dhp de 24 cm et plus, les résultats empiriques du présent avis sont comparables à ceux des simulations de Fortin *et al.* (2008) pour les classes M et R (Figure 4). Cependant, pour les classes S et C, nos résultats empiriques montrent des probabilités de mortalité beaucoup plus près de celles de la classe R que les prédictions de Fortin *et al.* (2008). En effet, ces auteurs avaient prédit, pour arbres des classes S et C, des probabilités de mortalité intermédiaires, entre celles des arbres des classes M et R (Figure 4). Nos résultats empiriques montrent plutôt que la mortalité des classes S et C se rapproche beaucoup plus de celle des arbres de la classe R que de ceux de la classe M (Figures 1 et 2). Pour le hêtre à grandes feuilles, le même constat s'applique, mais nos résultats empiriques montrent aussi une augmentation beaucoup plus forte des probabilités de mortalité avec le dhp que les simulations de Fortin *et al.* (2008, figures 3 et 4).

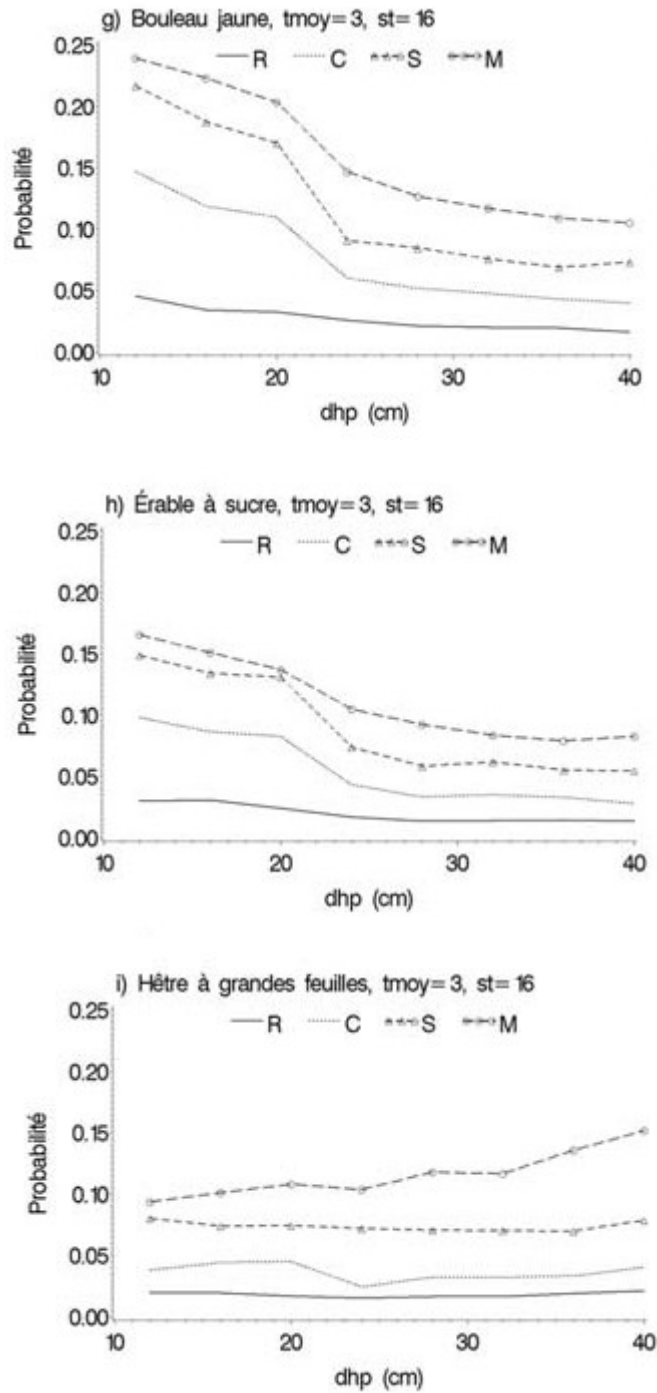


Figure 4. Exemples de probabilités de mortalité estimées par Fortin *et al.* 2008 pour le bouleau jaune, l'érable à sucre et le hêtre à grandes feuilles, à une température annuelle normale de 3 °C et à une surface terrière de 16 m²/ha, selon le dhp et la classe de priorité de récolte (tiré de Fortin *et al.* 2008).

5- Conclusion

Selon des observations sur une période de 5 ans, la classe de priorité de récolte M permet d'identifier des arbres ayant une très forte probabilité de mortalité chez les 3 principales essences feuillues du sud du Québec. Les distinctions entre les classes S, C et R sont moins grandes ou non significatives selon l'essence, notamment à cause du plus faible nombre d'observations pour le bouleau jaune et le hêtre à grandes feuilles. Du point de vue du risque de mortalité des arbres, ces résultats soulignent l'importance de distinguer les arbres de priorité M de ceux des autres classes, notamment la classe S. Ils indiquent aussi que les arbres des classes C et R ont des probabilités de mortalité très semblables, et qu'ils peuvent être regroupés au besoin. Étant donné que les arbres de priorité S ne sont pas compris dans le capital forestier en croissance (CFC), il serait préférable de ne pas les regrouper avec ceux des classes C et R, même si leurs probabilités quinquennales de mortalité ne sont pas très différentes pour le moment.

D'après les connaissances acquises avec les classes de vigueur, il faut s'attendre à ce que les écarts entre les classes diminuent avec le temps, entre autres parce qu'une partie des tiges des meilleures classes sera déclassée, puis mourra. Finalement, il n'est pas encore possible d'identifier des défauts pour lesquels le classement actuel de priorité de récolte devrait être révisé afin de mieux refléter la probabilité de mortalité associée à ladite classe.

6- Références

- Boulet, B., 2005. *Défauts externes et indices de la carie des arbres, guide d'interprétation*. Les Publications du Québec. Québec, QC. 291 p.
- Boulet, B., 2007. *Défauts et indices de la carie des arbres, guide d'interprétation*. 2^e éd. Les Publications du Québec. Québec, QC. 340 p.
- Fortin, M., S. Bédard et F. Guillemette, 2008. *Estimation par simulation Monte Carlo de la probabilité de mortalité quinquennale de l'érable à sucre, du bouleau jaune et du hêtre à grandes feuilles en peuplements de feuillus en fonction de la classification MSCR*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis technique. 8 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Fortin-Mathieu/AvisTechniqueMonteCarlo.pdf>].
- Guillemette, F., S. Bédard et M. Fortin, 2008. *Evaluation of a tree classification system in relation to mortality risk in Québec northern hardwoods*. For. Chron. 84(6): 886-899.

Hartmann, H., M. Beaudet et C. Messier, 2008. *Using longitudinal survival probabilities to test field vigour estimates in sugar maple (Acer saccharum Marsh.)*. For. Ecol. Manage. 256: 1771–1779.

[MRN] Ministère des Ressources naturelles, 2013. *Rapport d'activité 2012-2013 et Répertoire des projets de recherche 2013-2014*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Document en ligne.

[<http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/activites-recherche/projets/internes.asp>].

Dernière consultation le 25 juin 2014.

Régnière, J., B. Cooke et V. Bergeron, 1995. *BioSIM: Un instrument informatique d'aide à la décision pour la planification saisonnière de la lutte antiparasitaire – Guide d'utilisation*. Service Canadien des Forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Québec, QC. Rapport d'Information LAU-X-116F. 50 p. [<http://publications.gc.ca/pub?id=56936&sl=1>].

François Guillemette
Direction de la recherche forestière
Service de la sylviculture et du rendement des forêts