

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

Effets de la propagation du champignon
mérule pleureuse sur le comportement
hygrothermique d'assemblages à ossature de
bois, incluant les effets du climat

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Camille ROY

Sherbrooke (Québec) Canada

Avril 2024

MEMBRES DU JURY

Dominique DEROME

Directrice

Caroline FRENETTE

Codirectrice

Sébastien PONCET

Membre du comité

Mathieu ROBERT

Membre du comité

RÉSUMÉ

Le secteur du bâtiment contribue de façon considérable à l’empreinte écologique du Québec. Plusieurs se concentrent à trouver des manières de mieux construire, soit avec des matériaux plus respectueux de l’environnement ou encore avec des conceptions moins énergivores. Toutefois, le parc immobilier se renouvelle à très faible taux, et il y a fort à gagner à améliorer les bâtiments existants, par exemple en limitant leur dégradation. Puisque le parc immobilier du Québec est en grande partie soutenu par des structures de bois, il est pertinent de s’attarder aux agents dégradants biologiques, plus précisément les champignons de pourriture. Certains champignons destructeurs de bois sont de plus en plus présents au Québec et cette augmentation semble coïncider avec les changements climatiques. C’est le cas pour le champignon mэрule pleureuse. En partenariat avec l’organisme Mэрule Québec, ce projet de recherche vise à caractériser et simuler la dégradation d’assemblages à ossature de bois par la mэрule pleureuse et plus spécifiquement, à investiguer l’impact de la présence du champignon sur la performance hygrothermique des composantes de bois de ces assemblages. La méthodologie proposée vise à évaluer la performance hygrothermique de d’assemblages de mur à ossature de bois en fonction des conditions environnementales intérieures et extérieures pour sept villes au Québec. La mэрule pleureuse possède une capacité particulière par rapport aux autres champignons de dégradation dans le fait qu’elle peut déplacer sa source d’eau pour aller chercher des nutriments. Ainsi, la présence de la mэрule pleureuse dans l’enveloppe du bâtiment est modélisée par deux moyens : les propriétés modifiées de transport de l’eau obtenues à partir de mesures en laboratoire sur du bois contaminé et l’ajout de voies parallèles dans les composantes de bois pour simuler le transfert de l’humidité dans les assemblages au fil de la dégradation.

Les résultats du projet montrent que les propriétés du bois changent au fil de la dégradation par la mэрule pleureuse. L’étude montre que les valeurs d’absorption capillaire (A_{cap}) sont plus élevées pour les échantillons sains et que les valeurs de saturation capillaire (w_{cap}) semblent augmenter avec le niveau de contamination. Pour l’épinette, les valeurs de saturation effective (w_{sat}) augmentent avec le niveau de contamination. C’est l’inverse pour les échantillons de pin. Enfin, aucune conclusion n’est tirée des isothermes de sorption du pin, mais les isothermes de sorption sont plus bas pour les échantillons d’épinette contaminés. Les simulations montrent qu’au Québec, les régions de Montréal, Québec, Rivière-du-Loup, Rouyn-Noranda sont plus à risque d’offrir des conditions favorables à la pourriture alors que les conditions y sont moins favorables à Jonquière et Sept-Îles. Le projet montre qu’un assemblage de bois isolé et sec est bien protégé contre les agents de biodégradation, mais que, le risque de dégradation est accentué pour des composantes de bois humides et isolées. L’intégration des propriétés du bois caractérisées en laboratoire dans les simulations montre que les propriétés dégradées du bois peuvent améliorer le potentiel de séchage dans les climats plus chauds, mais accentuer la rétention d’eau dans les climats plus froids. L’ajout d’une composante de transfert d’eau pour imiter le comportement caractéristique de la mэрule pleureuse accentue légèrement la perte de masse par rapport au changement des propriétés seul.

Mots-clés : mэрule pleureuse, performance hygrothermique, pourriture, dégradation du bois, ossature de bois, modélisation, caractérisation expérimentale, *Serpula Lacrymans*

ABSTRACT

The building sector is a major contributor to Québec's ecological footprint. Many are focused on finding ways to build better, either with more environmentally friendly materials or with more energy-efficient designs. However, the building stock is being renewed at a very low rate, and there is much to be gained by improving existing buildings, for example by limiting their deterioration. Since much of Québec's building stock is supported by wood structures, it's worth looking at biological degrading agents, specifically decay fungi. Some wood-destroying fungi are increasingly present in Québec, and this increase seems to coincide with climate change. Such is the case of *Serpula lacrymans*.

In partnership with Mérieux Québec, this research project aims to characterize and simulate the degradation of wood-frame assemblies by *S. lacrymans* and, more specifically, to investigate the impact of the fungus's presence on the hygrothermal performance of the wood components of these assemblies. The proposed methodology consists in evaluating the hygrothermal performance of different wood-frame wall assemblies under various indoor and outdoor environmental conditions for seven cities in Québec. *S. lacrymans* has a particular ability compared to other decay fungi in that it can move its water source to seek nutrients. Thus, the presence of *S. lacrymans* in the building envelope is modeled by two means: modified water transport properties obtained from laboratory measurements on contaminated wood, and the addition of parallel paths in wood components to simulate moisture transfer in assemblies as degradation proceeds.

The results of the project show that wood properties change as *S. lacrymans* degrades the material. The study shows that capillary water absorption (A_{cap}) values are higher for healthy samples and that water content at capillary saturation (w_{cap}) values seem to increase with the level of contamination. For spruce samples, effective saturation (w_{sat}) values increase with the level of contamination, but the opposite is true for pine samples. Finally, no conclusions are drawn from the sorption isotherms for pine, but sorption isotherms are lower for contaminated spruce samples. Simulations show that, in the province, the regions of Montréal, Québec City, Rivière-du-Loup and Rouyn-Noranda are more likely to offer conditions favorable to decay, whereas conditions are less favorable in Jonquière and Sept-Îles. The project shows that an insulated, dry wood assembly is well protected against biodegrading agents, but that the risk of degradation is accentuated for damp, insulated wood components. Incorporating laboratory-characterized wood properties into simulations shows that degraded wood properties can improve drying potential in warmer climates but accentuate water retention in colder climates. Adding a water transfer component to mimic the characteristic behavior of *S. lacrymans* slightly accentuates mass loss compared to the change in properties alone.

Keywords: *S. lacrymans*, fungi-contaminated wood, property characterization, hygrothermal performance, wood-framed assemblies, modeling

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Dominique Derome pour son appui, sa confiance, son partage de connaissance, son optimisme pour les possibilités et sa passion pour la science du bâtiment. Je remercie Caroline Frenette de m'avoir motivé à faire une maîtrise et de son support, son écoute, et sa confiance en moi. Je remercie également Marie-Hélène Cauchon pour sa vision et son dévouement. Je suis très reconnaissante d'avoir eu la chance de réaliser ce projet avec vous mesdames. Je souligne la confiance qui nous a été accordée par Mérule Québec, qui a obtenu le financement du projet.

Je remercie chacune des personnes qui m'a accordé de son temps et qui m'a accueilli dans sa demeure pour que j'y prélève des échantillons de bois. Vous avez été indispensables au bon déroulement de ce projet.

Je remercie Alexander Salenikovich pour son support à la réalisation et l'analyse des résultats des essais mécaniques et Ann Delwaide, tous deux de l'Université Laval, pour son temps et son accompagnement pour l'identification des échantillons de bois récoltés pour le projet.

Je remercie Gabriella et Raphaël, stagiaires extraordinaires qui ont su faire de mon projet leur mission et m'épauler dans cette aventure pour quelques mois.

Un remerciement tout spécial à Frédéric pour son aide, sa disponibilité, son intérêt, son ingéniosité à trouver des solutions et sa capacité rendre les travaux de laboratoire toujours plus agréables.

Finalement, je remercie mon entourage génial qui me soutient dans les hauts comme dans les bas et qui m'encourage aveuglement puisque selon eux tout est possible.

Cette recherche a reçu le soutien financier de la Société d'habitation du Québec dans le cadre du programme d'aide aux organismes communautaires et le soutien financier de Mitacs dans le cadre du programme Mitacs Accélération.



TABLE DES MATIÈRES

Introduction	13
1.1 Problématique de recherche.....	14
1.2 Objectifs du projet de recherche.....	15
1.3 Contributions originales	15
1.4 Plan du document	16
Revue critique de la littérature.....	17
2.1 Notions de base du bois.....	17
2.2 Mérule pleureuse	20
2.3 Évaluation hygrothermique de l’enveloppe du bâtiment.....	23
2.4 Interaction du bois dégradé par la pourriture avec l’eau	27
2.5 Évaluation de conditions menant à la pourriture.....	28
2.6 Essais mécaniques	30
2.7 Conditions aux limites – Données météorologiques	33
2.8 Sommaire.....	36
Complément méthodologique	37
3.1 Collecte du bois	37
3.2 Simulations	42
3.3 Propriétés du bois	44
Hygrothermal characterization and performance of wood in assemblies accounting for contamination by <i>Serpula lacrymans</i>	45
4.1 Avant-propos.....	45
4.2 Abstract.....	47
4.3 Introduction	48
4.4 Methodology.....	49
4.4.1 Characterization of damaged wood	49
Density.....	52
Porosity	52
Permeability.....	52
Water vapor sorption isotherms.....	53
Capillary water absorption, water content at capillary saturation and effective	

saturation	54
Mechanical properties	54
4.4.2 Parametric hygrothermal evaluations of assemblies with contaminated wood	55
Simulation setup	56
Outdoor climates	56
Indoor and crawl space conditions	57
Base wall assembly configuration	57
Development of the simulation protocol	58
Mass loss	59
4.5 Results and discussion	59
4.5.1 Characterisation of contaminated wood.....	59
Hygrothermal properties	59
Mechanical properties	61
4.5.2 Hygrothermal performance of assemblies with contaminated components	66
Assessment of contaminated wood hygrothermal properties	66
Hygrothermal simulation results	67
Model sensitivity	71
4.6 Discussion and conclusion.....	72
Conclusion	75
5.1 Contributions du projet de recherche.....	77
5.2 Limites et recommandations.....	78
LISTE DES RÉFÉRENCES	80
Annexe A	85

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Constituants chimiques et structure des parois cellulaires d'un matériau lignocellulosique.	20
Figure 2.2 Appareil reproducteur de la mэрule pleureuse dans un vide sanitaire	21
Figure 2.3 Cordons mycéliens [21]	23
Figure 3.1 Latte de mur recouverte par la mэрule pleureuse (haut de l'image) et non contaminée (bas de l'image).....	38
Figure 3.2 Schématisation de la Phase 1	43
Figure 3.3 Schématisation de la Phase 2	44
Figure 3.4 Schématisation de la Phase 3	44
Figure 4.8 a) Permeability cell with wood sample, b) Lithium chloride solution in desiccator, c) Set-up for imbibition test, d) Set-up for three-point bending test	53
Figure 4.9 a) Schematic representation of wall assembly, highlighting the zones of interest, b) Subdivision of header joist and wall plate into 6 zones each.....	58
Figure 4.10 Pine and spruce sorption isotherms, with levels of contamination C1 in green, C2 in red and C3 in black.....	61
Figure 4.11 a) MOE and b) MOR values for pine samples.....	64
Figure 4.12 a) MOE and b) MOR values for spruce samples	65
Figure 4.13 a) Spruce sample with no sign of contamination b) Spruce sample with signs of degradation c) Spruce specimen covered by <i>S. lacrymans</i>	65
Figure 4.14 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 8 of spruce joist for the 2 scenarios, 2 configurations and 7 cities.	68
Figure 4.15 Repartition of mass loss in time for a) Scenario 1a b) Scenario 2a c) Scenario 2b, for spruce assembly under the climate of the cities of Rivière-du-Loup, Québec, and Rouyn-Noranda.	69
Figure 4.16 Comparison of mass loss and MC for three simulation phases for spruce assembly for Scenario 2b in Montréal and with changing material properties to reflect biodegradation at 4% and 13.3% mass loss.....	71
Figure 4.17 Comparison of the influence of isotropic and orthotropic wood properties on temperature, relative humidity, and moisture content in a section of sill plate, for scenario 2b for Montréal.	72
Figure A.1 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 1 (Spruce).....	86
Figure A.2 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 2 (Spruce)	87
Figure A.3 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 3 (Spruce)	88
Figure A.4 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 4 (Spruce)	89
Figure A.5 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 5 (Spruce).....	90
Figure A.6 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 6 (Spruce).....	91
Figure A.7 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould	

index for zone 7 (Spruce)	92
Figure A.8 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 8 (Spruce)	93
Figure A.9 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 9 (Spruce)	94
Figure A.10 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 10 (Spruce)	95
Figure A.11 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 11 (Spruce)	96
Figure A.12 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 12 (Spruce)	97
Figure A.13 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 1 (Pine)	98
Figure A.14 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 2 (Pine)	99
Figure A.15 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 3 (Pine)	100
Figure A.16 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 4 (Pine)	101
Figure A.17 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 5 (Pine)	102
Figure A.18 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 6 (Pine)	103
Figure A.19 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 7 (Pine)	104
Figure A.20 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 8 (Pine)	105
Figure A.21 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 9 (Pine)	106
Figure A.22 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 10 (Pine)	107
Figure A.23 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 11 (Pine)	108
Figure A.24 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 12 (Pine)	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Logiciels de simulation et leurs catégories ([29] [23]).....	25
Tableau 2.2 Méthodes indépendantes de la construction utilisées pour la sélection d'une année de référence	34
Tableau 3.1 Détail des résidences visitées pour la collecte des échantillons	39
Table 4.1 Specimens used for the project with dimensions, provenance (administrative region) and date of site visit	51
Table 4.2 Location, average January and July air temperatures and annual rain loads for the seven selected cities.....	57
Table 4.3 Composition of the assemblies.....	58
Table 4.4 Physical properties of pine and spruce of 3 contamination levels	60
Table 4.5 Types of failure for pine and spruce samples [42, with permission]	62
Table 4.6 MOE and MOR values of pine and spruce and 3 contamination levels	64
Table 4.7 MOE and MOR values and densities as measured for two S3 samples.....	66
Table 4.8 Base properties of pine and spruce and calibrated properties of spruce wood at two contamination levels.....	67

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
MOE	Module d'élasticité
MOR	Module de rupture
RH	Humidité relative
TH	Teneur en eau

CHAPITRE 1

Introduction

Les changements climatiques amènent, au Québec, des températures plus douces sur des durées plus longues en comparaison aux données climatiques des 30 dernières années [1]. Ces augmentations en intensité et en durée font en sorte que certains agents dégradant le bois, qui n'étaient pas considérés comme des menaces actives dans les bâtiments au Québec, sont de plus en plus présents. Les températures plus clémentes et les hivers moins rigoureux font en sorte qu'un champignon comme la mérule pleureuse, qui auparavant ne pouvait pratiquement pas croître et survivre au Québec, peut désormais s'y établir [2]. La mérule pleureuse, parfois surnommée « cancer du bâtiment », est un champignon de pourriture qui se nourrit du bois des bâtiments qu'il contamine [3]. La déshydratation et la décomposition du bois entraînées par la mérule pleureuse en diminuent ses propriétés structurales. Les bâtiments contaminés sont donc, entre autres, exposés à un risque d'effondrement.

La recherche existante sur le développement de la mérule pleureuse dans les bâtiments a été principalement menée en Europe. Ces données peuvent difficilement être appliquées au Québec, puisque les systèmes constructifs et les techniques de constructions utilisés diffèrent de ceux de l'Europe [4], les essences de bois qui composent les structures ne sont pas les mêmes, puis les charges climatiques et environnementales sont différentes. À partir du constat du manque de données scientifiques quant à la contamination des bâtiments à la mérule pleureuse au Québec, la cinquième recommandation du rapport interministériel sur l'état de la situation de la mérule au Québec [2] propose d'améliorer les connaissances sur la propagation de la mérule en milieu bâti.

La découverte d'un bâtiment contaminé par la mérule pleureuse nécessite inévitablement une prise en charge de la part des propriétaires, puisque les bâtiments infectés ne sont plus couverts par les assurances [5]. L'intervention face à la problématique se fait soit par la décontamination ou par la démolition et est nécessairement coûteuse. Il est donc pertinent d'approfondir les connaissances sur la propagation du champignon pour identifier l'ampleur du problème adéquatement dans chaque situation et, de ce fait, limiter les impacts financiers et techniques pour les propriétaires.

Toutefois, certains cas de mэрule ont été observés à la suite d'interventions écoénergétiques. En effet, certains programmes de subvention pour la rénovation et l'efficacité énergétique font la promotion de l'isolation des vides sanitaires par l'intérieur. Ces programmes ne font pas de mention spécifique concernant la détection et la gestion des sources d'humidité dans le bois préalablement à son recouvrement par la matière isolante. Ainsi, la quantification comparative de la dégradation potentielle des composantes de bois d'un vide sanitaire après son isolation reste à déterminer.

Se basant sur une application adéquate des équations de transfert de masse et de chaleur, les logiciels de simulation hygrothermique sont des outils intéressants qui peuvent permettre de vérifier quelles conditions environnementales contribuent à la dégradation des composants d'un bâtiment. Des simulations hygrothermiques selon différentes régions au Québec pourront permettre d'identifier dans quelles conditions la croissance du champignon est optimale pour ainsi permettre de cibler les endroits propices au développement de la mэрule pleureuse et d'y effectuer de la prévention. L'étude des transferts hygrothermiques et de la résistance structurale d'échantillons de bois affectés à différents degrés par la mэрule pleureuse dans des contextes climatiques historiques québécois, permettra sans doute de contribuer à en accroître les connaissances scientifiques.

1.1 Problématique de recherche

Le besoin soulevé est le manque de connaissances scientifiques sur l'influence de la dégradation par la mэрule pleureuse sur le comportement hygrothermique des structures de bois au Québec et au Canada. Ce manque amène, entre autres, divers enjeux sociaux et économiques chez les propriétaires de bâtiments affectés. Ce projet de recherche vise à répondre à la question suivante :

Est-ce que le développement de la mэрule pleureuse et les dommages qu'elle cause dans les ossatures de bois, ainsi que l'influence de différentes conditions climatiques et de milieux au Québec, peuvent être caractérisés et modélisés ?

1.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif général du projet est de développer une connaissance du comportement et de la propagation de la mэрule pleureuse dans les structures de bois afin d'évaluer quels seront les dommages causés par le champignon dans différentes conditions environnementales.

Afin de combler le manque entre la situation actuelle et la situation désirée, trois objectifs spécifiques sont définis. Le premier consiste à développer un modèle de simulation de transfert de chaleur et d'humidité dans du bois affecté par la mэрule pleureuse. Le second vise à valider le modèle développé avec des mesures et des données recueillies sur des échantillons de bois contaminés en laboratoire et des données prises in situ. Le dernier consiste à utiliser le modèle de simulation pour effectuer des analyses paramétriques sur des assemblages de murs prédéterminés dans des conditions environnementales spécifiques pour bâtir une connaissance accrue de la propagation et des dommages causés par la mэрule pleureuse sur le territoire québécois. Ce dernier objectif implique d'effectuer les analyses avec des données climatiques historiques pour sept villes au Québec.

1.3 Contributions originales

Ce projet contribue à augmenter le bagage de connaissances scientifiques actuel au sujet de la propagation et des dommages causés par la mэрule pleureuse au Québec. Il contribue à la science avec des propriétés physiques de bois contaminé par le champignon, caractérisées en laboratoire et en permettant de mesurer l'impact du changement de propriétés du bois, au fil de la dégradation, tout au long des simulations hygrothermiques sur une perte de masse calculée en post-traitement. Ce projet contribue également à mettre en lumière les problématiques pouvant être encourues par l'isolation de bois humide dans une enveloppe de bâtiment dans différentes villes du Québec. Finalement, ce projet a permis de bâtir sept fichiers météorologiques de référence de conditions propices aux problèmes hygrothermiques pour le Québec, pouvant être intégrés aux logiciels de simulations hygrothermiques.

1.4 Plan du document

Ce mémoire, en format par article, contient cinq chapitres. Le premier chapitre est l'introduction. Le second comprend une revue critique de la littérature qui permet de faire l'état de l'art relatif au projet de recherche. Le troisième chapitre comprend des informations complémentaires au chapitre 4 qui présente un article scientifique avec une méthodologie détaillée et un avant-propos. Les résultats permettant de répondre aux objectifs du projet de recherche sont traités dans cet article. Le dernier chapitre conclut ce document par un sommaire des travaux réalisés, les contributions du projet, certaines limites et recommandations à la lumière des travaux effectués, et finalement quelques perspectives qui permettraient de poursuivre le projet.

CHAPITRE 2

Revue critique de la littérature

Cette section présente la revue critique des écrits publiés en lien avec le projet de recherche.

2.1 Notions de base du bois

Le bois, contrairement à la plupart des autres matériaux utilisés dans le domaine de la construction, est issu d'un organisme vivant. Lorsqu'il est question de bois, on réfère au matériau provenant de plantes ligneuses. Les plantes ligneuses, dont les arbres, se définissent entre autres par le fait qu'elles possèdent des tissus de transport spécialisés, comme le xylème et le phloème et elles se distinguent également par la croissance de leur tige en diamètre [6]. La structure complexe du bois présente des différences marquées dans son anatomie et sa structure considérée aux échelles macroscopique, microscopique et cellulaire, autant dans le bois des résineux que dans celui des feuillus.

À l'échelle macroscopique, il est possible de discerner des cernes annuels. Les cernes annuels sont des cercles concentriques qui s'observent dans une coupe transversale du bois. Ils sont attribués à la croissance en diamètre de l'arbre due au cambium qui est une couche de cellule en constante division cellulaire, formant vers l'intérieur, le xylème et vers l'extérieur le phloème et l'écorce. Dans la saison de croissance d'un arbre, les cellules produites forment deux types de bois, le bois initial et le bois final, qui sont respectivement produits au début et à la fin de la saison de croissance. Plus en détail, les cellules de bois initial ont des diamètres intérieurs plus grands (e.g. lumens de 50 à 100 microns pour l'épinette) et des parois plus minces (1 à 2 microns) que les cellules de bois final (lumen de moins de 10 microns, paroi cellulaire de 5 à 10 microns), ce qui fait en sorte que le bois initial est généralement de couleur plus pâle que le bois final. Cette distinction dans la teinte du bois permet de discerner à l'œil nu les cernes annuels dans le bois [7].

À l'échelle microscopique, ce sont trois principaux types de cellules qui composent la structure du bois des résineux, soit les trachéïdes longitudinales, les trachéïdes transversales et les parenchymes. Les trachéïdes longitudinales représentent plus de 90% du volume du bois de résineux. Elles sont les plus longues cellules dans le bois, e.g. une moyenne de 2 mm pour

l'épinette, et ont pour fonctions principales, la conduction de la sève brute (eau) dans l'arbre et le support mécanique de l'arbre. Les trachéïdes transversales ne sont pas présentes dans toutes les essences résineuses. Elles sont des cellules mortes dans l'orientation radiale du bois et elles sont associées aux rayons ligneux qui servent au transport complexe de la sève du phloème vers les cellules vivantes du bois d'aubier (partie périphérique du tronc, par rapport au bois de cœur). Finalement, les parenchymes sont sous-divisés en trois types, soit les parenchymes de rayon, les cellules épithéliales et les parenchymes longitudinaux. Les parenchymes orientés longitudinalement, c'est-à-dire les parenchymes longitudinaux et les cellules épithéliales, ont pour fonction de sécréter des résines ou de fournir des réserves de substances nutritives. Les parenchymes longitudinaux ne sont pas très fréquents dans le bois des résineux contrairement à celui des feuillus. Ils prennent la forme de files dans l'orientation longitudinale où ils occupent la fonction de tissus de réserve. Ce sont les cellules épithéliales qui génèrent la résine dans le bois des résineux. Ces cellules tapissent les canaux résinifères longitudinaux et transversaux qui sont en fait des espaces intercellulaires. Le dernier type de parenchyme est le parenchyme de rayon. Ces cellules forment les rayons en direction radiale du bois. Les rayons représentent environ 7% du volume total du bois dans les résineux. Les parenchymes et les trachéïdes sont reliés à leurs interfaces par des ponctuations. Les ponctuations sont des discontinuités dans la paroi des cellules qui forment des ouvertures qui servent au passage des liquides dans l'arbre vivant. Les ponctuations peuvent être simples, aréolées ou semi-aréolées et se trouver entre deux parenchymes, entre deux trachéïdes ou encore entre un parenchyme et une trachéïde [7].

Afin de comprendre les interactions du matériau bois avec son environnement, il est intéressant de s'attarder à la composition chimique et à la structure des cellules qui le compose. Les parois des cellules de bois sont composées de trois principaux constituants, soit la cellulose, les hémicelluloses et les lignines. La cellulose est le constituant le plus important du bois en termes de pourcentage de sa masse anhydre (40 à 50%) [8]. C'est un polymère constitué de monomères appelés cellobiose qui sont essentiellement deux cycles de glucose liés par des liaisons β -glycosidiques. Le long des chaînes de celluloses, de nombreux groupements hydroxyyles (-OH) sont disponibles pour former des liaisons hydrogène latérales avec d'autres chaînes de cellulose. Ce sont ces groupements qui en expliquent l'hygroscopicité

des formes amorphes et qui permettent l'assemblage de cristaux. La cellulose cristalline est synthétisée par des complexes de cellulose synthase. La cellulose est présente dans le bois principalement sous sa forme cristalline, mais également sous des phases amorphes ou paracristallines. Les atomes des zones amorphes sont moins ordonnés que dans les zones cristallines, ce qui implique une hygroscopicité plus grande due aux groupements hydroxyles libres. Les hémicelluloses sont des polysaccharides de masse molaire plus faible que la cellulose. En opposition à la cellulose, les hémicelluloses sont constituées de glucides variés, le plus souvent le glucose, le galactose, le mannose, l'acide glucuronique, l'acide galacturonique, le xylose et l'arabinose, liés par des liaisons α ou β [9]. Les hémicelluloses constituent 20 à 40% de la masse anhydre du bois [8] et présentent une hygroscopicité similaire à la cellulose amorphe. Les lignines sont des macromolécules complexes et amorphes, présentes dans le bois sous la forme de polymères réticulés, donc tridimensionnels. Les lignines assurent un rôle d'imperméabilité des cellules conductrices de sève dû à leur nature plus hydrophobe. Ce constituant compte pour 20 à 35% de la masse anhydre du bois [8]. En addition aux principaux constituants, le bois est constitué d'une quantité variable de cendres et d'extractibles qui peuvent contribuer à réduire l'hygroscopicité et la perméabilité du bois, en plus d'affecter sa résistance aux agents de dégradation biologique [10] et lui donner une couleur ou odeur particulière.

Les parois des cellules sont composées de quatre couches. La paroi primaire (P) est produite dès le début de la croissance des cellules. À l'atteinte de la maturité dimensionnelle, les cellules produisent un exosquelette, i.e. la couche secondaire (S) en trois phases (S1, S2, S3). La couche secondaire est formée d'une matrice de microfibrilles, qui sont des enlignements de cristaux de cellulose, dont les espaces sont comblés par les lignines et les hémicelluloses. La matrice des cellules de bois est légèrement poreuse puisque le remplissage des espaces entre les microfibrilles n'est jamais complet, ce qui laisse place à des nanopores qui permettent à l'eau de pénétrer molécule par molécule dans la paroi cellulaire. La couche S1 a une épaisseur de 0,1 à 0,2 μm et ses microfibrilles sont angulées entre 50 et 70° par rapport à la direction axiale de la cellule. La couche S2 a une épaisseur de 1 à 10 μm avec des microfibrilles en angle de 10 à 30° par rapport à la direction axiale. La faible angulation des microfibrilles de la couche S2 restreint le gonflement dans la direction longitudinale de la cellule et fait en

sorte que la couche S2 change de dimension de façon marquée en épaisseur, et beaucoup moins en longueur lors de la sorption de l'eau. De plus, c'est la variation d'épaisseur de la couche S2 qui différencie les dimensions de la paroi cellulaire dans le bois initial et final. La couche S3 a une épaisseur de 0,05 à 0,35 μm et les microfibrilles qui la composent forment un angle de 60 à 90° par rapport à la direction axiale de la cellule [11] [12]. La Figure 2.1 illustre la hiérarchie des quelques constituants chimiques et de la structure des parois cellulaires d'un matériau lignocellulosique.

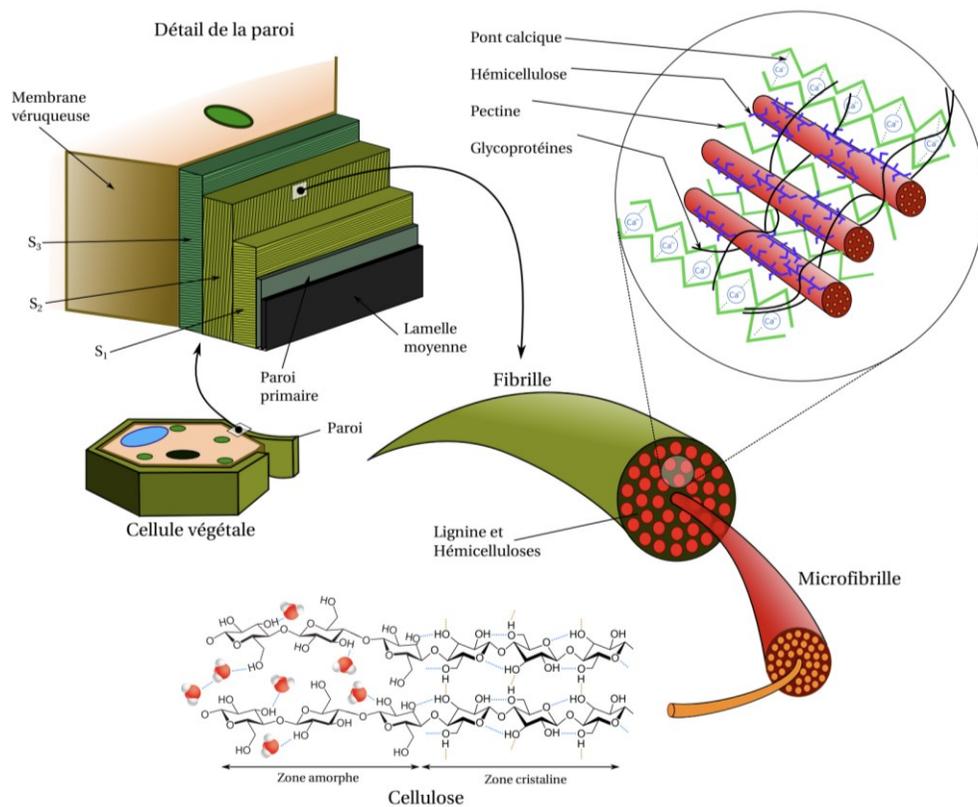


Figure 2.1 Constituants chimiques et structure des parois cellulaires d'un matériau lignocellulosique.

Image : Jean-Romain Roussel (avec permission)

2.2 Mérule pleureuse

La mérule pleureuse (*Serpula Lacrymans* (Wulfen) J. Schröt) est un champignon basidiomycète dit lignivore, qui dégrade la cellulose du bois et qui entraîne le phénomène de pourriture sèche [13]. D'origine asiatique, la mérule pleureuse aurait migré en Europe, en

Amérique et en Océanie par le transport maritime ou terrestre de pièces de bois apparemment infectées par le champignon [14]. L'intolérance de la mэрule pleureuse aux changements brusques de températures, à la lumière ou au vent, fait en sorte que le champignon se situe majoritairement à l'intérieur des bâtiments, et non en milieu naturel [15]. La mэрule pleureuse serait, à ce jour, l'une des causes les plus destructrices du matériau bois à l'intérieur des bâtiments des régions au climat tempéré [16]. La Figure 2.2 montre l'appareil reproducteur de la mэрule pleureuse dans un vide sanitaire d'une résidence au Québec.



Figure 2.2 Appareil reproducteur de la mэрule pleureuse dans un vide sanitaire

Image : Mэрule Québec

Pour arriver à comprendre les mécanismes de propagation du champignon dans les éléments de structure de bâtiments en bois, il faut d'abord connaître ses conditions de développement et de croissance. Les conditions favorables à la croissance de la mэрule pleureuse se situent à des températures entre 3 °C et 26 °C combinées à une humidité relative de l'air supérieure à 76% RH [17]. La teneur en humidité minimale dans le bois nécessaire à l'initiation de la germination est de 21% TH [4]. Ce qui distingue la mэрule pleureuse des autres champignons de pourriture, c'est qu'elle a non seulement la capacité de transporter de l'eau par son mycélium établi sur les structures de bois, mais aussi de bâtir des cordons mycéliens (ou rhizomorphes) sur des matériaux inertes et secs, comme la maçonnerie, ce qui fait en sorte que le champignon peut atteindre des composantes de bois du bâtiment non adjacentes à celles contaminées initialement [4]. Le transport de l'eau par le mycélium de la mэрule pleureuse a

été quantifié dans une étude réalisée en Angleterre [18]. Cette étude fournit des informations quant au taux d'absorption de l'eau par le mycélium à la source de nutriment et à propos du volume d'eau qui se déplace à travers une section unitaire de mycélium par unité de temps. Les résultats de cette étude montrent un taux d'absorption variable qui fluctue de manière irrégulière. Néanmoins, une évaluation des résultats indique un flux moyen de masse de $3,89 \times 10^{-8}$ kg/s pour une section de $0,051 \text{ mm}^2$ de mycélium, environ 0,014 ml par heure pour un mycélium de 0,2 mm par 0,2 mm, un flux apparemment suffisant pour la croissance du mycélium [18].

Pour ce qui est des composantes du champignon, les hyphes sont des filaments tubulaires dont le diamètre et la longueur dépendent de l'environnement de croissance et de l'espèce de champignon. Le réseau créé par la croissance des hyphes est appelé mycélium dont la densité et la configuration dépendent des nutriments et des conditions climatiques de l'environnement dans lequel il évolue [19]. Islam et al. [20] mentionnent qu'à l'échelle microscopique, le mycélium est un réseau de polymères dont les propriétés mécaniques sont déterminées par chacun des filaments qui composent le réseau. Cette variation dans les propriétés mécaniques en fonction de l'endroit où on se trouve dans le mycélium rappelle les propriétés mécaniques du bois qui sont également dictées par les constituants de chacune de ses cellules. On note que les cordons mycéliens (Figure 2.3) sont aussi formés à partir d'hyphes mais à l'extérieur d'une matrice ligneuse.

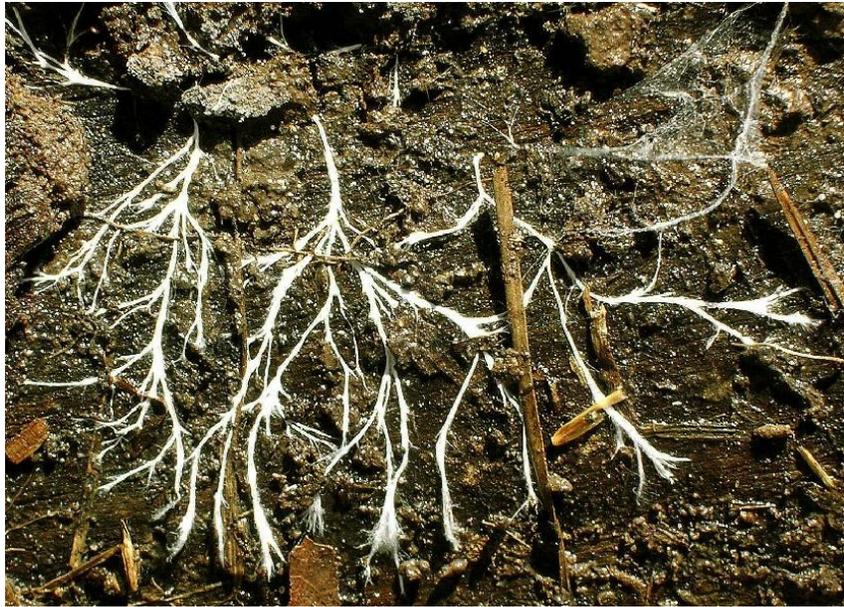


Figure 2.3 Cordons mycéliens [21]

2.3 Évaluation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment

Pour évaluer la performance hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment, on considère les assemblages formés de composants en contact parfait les uns aux autres. On considère les transferts de chaleur et de masse, c'est-à-dire d'eau liquide et vapeur, selon les conditions imposées aux limites du système. Ces phénomènes sont représentés par les équations qui suivent.

Le transfert de chaleur q (kJ) dépend de la conductivité thermique du matériau (k) et de la différence de température T entre les deux éléments ou milieux ($^{\circ}\text{C}$) (Équation 2.1) :

La loi de Fourier de conduction thermique :

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

L'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

L'équation 2.2 représente la conservation de la chaleur dans un système fermé sans travail et peut se conceptualiser par l'égalité suivante, où la différence entre la chaleur entrante et celle sortante du système est la chaleur qui est stockée, égale à la masse volumique d'un objet ρ (kg/m^3) multipliée par sa chaleur spécifique à pression constante c_p ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$),

Le transfert de masse g ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) est analogue au transfert de chaleur et est divisé en eau vapeur g_v , puis en eau liquide g_l (Équation 2.3).

$$g = g_v + g_l \quad (2.3)$$

où,

$$g_v = -\delta_p \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.4)$$

Dans l'équation 2.4, δ_p est la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (s ou $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$), p_v est la pression de vapeur partielle (Pa) et x est l'épaisseur du matériau (en m).

$$g_l = K_l \cdot \frac{\partial p_c}{\partial x} \quad (2.5)$$

Dans l'Équation 2.6, K_l est la perméabilité à l'eau liquide (s ou $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$) et p_c est la pression capillaire (Pa) qui est la différence entre la pression des gaz et celle des liquides aux interfaces dans le matériau poreux [22]. Le tout peut également être calculé en termes de pression capillaire p_c (Pa), avec l'équation de Kelvin :

$$g_{\text{matériau}} = -K(p_c) \nabla p_c \quad (2.6)$$

L'Équation 2.7 représente la conservation de la masse en fonction de la pression capillaire, où w est le contenu en eau (kg/m^3) :

$$\nabla g = \frac{\partial w(p_c)}{\partial t} \quad (2.7)$$

Étant donné que ces équations sont des différentielles partielles, le transport couplé de la chaleur et de l'humidité dans les assemblages d'enveloppe de bâtiment doit être simulé numériquement. Ces modèles numériques peuvent intégrer des simplifications de phénomènes physiques réels. Quelques logiciels commerciaux de simulation hygrothermique ont fait l'objet d'efforts soutenus et sérieux et leurs codes ont été validés par comparaison avec des données expérimentales [23]. Les logiciels disponibles pour le faire sont, entre autres, WUFI [24] et Delphin [25], en plus des solveurs tels COMSOL [26]. Le Tableau 2.1 présente ces logiciels et leurs catégories. Les logiciels hygIRC [27] et MOIST [28] qui étaient disponibles dans le passé, sont inclus mais ne semblent plus supportés par leurs développeurs.

Tableau 2.1 Logiciels de simulation et leurs caractéristiques ([29] [23])

Logiciel	Caractéristiques
COMSOL	Simulation de chaleur, air et humidité, simulation en 1D, 2D et 3D, solveur commercial en éléments finis, gradient de teneur en humidité comme force motrice, applications non-spécifique à l'enveloppe du bâtiment [26].
Delphin	Simulation de transfert couplé de chaleur, air et eau, simulation en 1D, 2D et 3D, solveur par volume de contrôle, gradient de pression capillaire comme force motrice, logiciel commercial spécifique à l'enveloppe de bâtiment. Delphin permet de simuler le transport de chaleur, d'air, d'humidité, de polluants et de sels dans les matériaux poreux. Ce logiciel a la capacité d'estimer la croissance de moisissures et la perte de masse due à la pourriture dans le temps et de calculer les ponts thermiques [25].
WUFI	Simulation de transfert couplé de chaleur et eau simulation en 1D

	(WUFI Pro) et 2D (WUFI 2D), solveur par volume de contrôle, gradient de teneur en humidité comme force motrice, logiciel commercial spécifique à l’enveloppe de bâtiment. Ce logiciel permet d’estimer la croissance de moisissures [24].
hygIRC	Simulation de chaleur, air et eau, simulation en 1D et 2D, gradient de teneur en humidité comme force motrice, logiciel spécifique aux murs extérieurs de bâtiment [27].
MOIST	Simulation de chaleur et d’eau, simulation en 1D seulement, logiciel spécifique à l’enveloppe de bâtiment qui est apte à simuler des assemblages à géométries simples et complexes comme des murs ou des toitures en pente. L’outil sert entre autres à prédire la teneur en eau dans les couches extérieures des assemblages pour déterminer si ceux-ci nécessitent un pare-vapeur. MOIST permet également d’estimer les vitesses de séchage des matériaux [28].

Une étude récente menée par Defo et al. [30] vise à comparer les résultats de simulation hygrothermique de Delphin, WUFI, hygIRC et COMSOL pour des enveloppes à ossature légère en bois dans trois villes canadiennes de climats différents. Les différences de résultats observées entre les quatre logiciels sont surtout reliées à l’implémentation des propriétés des matériaux, à l’humidité relative calculée dans les matériaux de l’enveloppe et à l’interaction de la pluie battante avec les revêtements extérieurs. La détermination des propriétés des matériaux utilisées dans les logiciels dépend des variables d’état considérées pour les mécanismes de transfert et de stockage de chaleur et d’humidité dans les matériaux. Pour le transfert de l’eau, la force motrice utilisée varie. D’après l’article de Defo et al. , hygIRC et WUFI utilisent comme force motrice un gradient de teneur en humidité, alors que Delphin utilise le gradient de pression capillaire. COMSOL utilise également un gradient de teneur en humidité dans un de ces modules spécialisés, mais permet à l’utilisateur d’ajouter d’autres formulations des équations de transfert. Une étude réalisée par Janssen en 2014 [31], qui visait à comparer les différentes variables d’état lors du transfert d’humidité en contexte de simulations hygrothermiques, a révélé que, parmi les trois modes étudiés, soit la pression

capillaire, l'humidité relative et le logarithme de la pression capillaire, le logarithme de la pression capillaire performe mieux que la pression capillaire et que l'humidité relative dans les cas de transferts hygroscopiques. Cependant, la pression capillaire et l'humidité relative performent beaucoup mieux que le logarithme de la pression capillaire dans des conditions se rapprochant de la saturation. L'auteur de l'article conclue que la pression capillaire et l'humidité relative sont les variables les plus efficaces pour les simulations de transferts d'humidité générales puisqu'on ne peut pas exclure les conditions se rapprochant de la saturation. Pour cette étude, c'est Delphin qui sera retenu.

Le logiciel Delphin offre dès son installation une base de données contenant plusieurs matériaux de construction. De plus, le logiciel permet à l'utilisateur d'y ajouter les matériaux qui sont nécessaires à son analyse, selon des paramètres préétablis.

2.4 Interaction du bois dégradé par la pourriture avec l'eau

Dès le début de la colonisation du bois par un champignon, les propriétés physiques du matériau sont altérées. Les enzymes qui dégradent la matrice du bois provoquent des changements dans la capacité des cellules du bois à gérer la vapeur d'eau et l'eau liquide. Deux travaux récents se sont intéressés aux interactions du bois dégradé par les champignons de pourriture avec l'eau. Selon Zabel et Morrell [32], la teneur en eau à l'équilibre du bois dégradé par les champignons de pourriture brune devrait être plus basse que celle du bois sain. Ceci pourrait être expliqué par la préférence des champignons de pourriture brune, comme la méréule pleureuse, à dégrader d'abord les régions de cellulose amorphe, qui contiennent généralement plus d'eau que les zones de cellulose cristalline. Les travaux de Karppanen et al. [33], quant à eux, présentent des résultats inverses. Dans ce travail expérimental, la teneur en eau à l'équilibre se trouve à être plus élevée pour les échantillons de bois contaminés que pour les échantillons de bois sain. La différence entre les deux conclusions pourrait être expliquée par le fait que Zabel et Morrell [32] mettent tous les champignons de pourriture brune dans une même catégorie et que Karppanen et al. [33] réalisent leur étude sur un seul champignon (*Coniophora puteana*) et une seule essence de bois (*Pinus sylvestris*). Plusieurs agents dégradant le bois se déplacent dans le matériau par les ponctuations. Ces ponctuations ont généralement une membrane qui limite le déplacement de l'eau dans le bois. L'action

bactérienne, provoquée par les champignons de pourriture contribue à l'élimination de cette membrane. Ainsi, les bois dégradés par la pourriture devraient absorber et désorber l'eau plus facilement que les bois sains [32]. Bien que ces études apportent des pistes de réponse par rapport aux propriétés physiques du bois contaminé par les champignons de pourriture, elles n'ont été réalisées que sur un nombre limité de champignons et d'essences de bois. Il est donc nécessaire d'approfondir ces connaissances spécifiquement pour la mérule pleureuse.

2.5 Évaluation de conditions menant à la pourriture

Le post-traitement des résultats de simulations hygrothermiques permet d'évaluer le comportement des éléments simulés. Ainsi, les données hygrothermiques peuvent servir à évaluer le développement de la moisissure ou de la pourriture dans les éléments de structure en bois. Deux approches existent : la prédiction de la croissance d'un champignon en fonction de conditions hygrothermiques calculées [34] et la prédiction du développement du champignon lui-même par la simulation [33].

La première approche consiste à quantifier, par les équations de Viitanen et al. [35], le niveau de développement du champignon selon les conditions environnementales. La croissance de différents champignons a été mesurée sur plusieurs matériaux, entre autres, sur du bois d'aubier de pin (partie périphérique du tronc, par rapport au bois de cœur). La progression de la pourriture est évaluée par la perte de masse dans le bois. Le modèle comprend deux processus. Le premier est le processus d'activation. Un paramètre α est défini en fonction de l'humidité relative de l'air RH (%), de la température de l'air T (°C) et du temps t (h). Le paramètre α est adimensionnel et varie entre 0 et 1 où 1 est l'initiation de la perte de masse. Aussi longtemps que α reste sous la valeur de 1, aucune perte de masse ne peut commencer. Le paramètre α peut croître et décroître selon les conditions et il se calcule à partir des équations suivantes (Équations 2.8 et 2.9) :

$$\alpha(t) = \int_0^t d\alpha = \sum_0^t (\Delta\alpha), \text{ où}$$

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta t}{t_{crit}(RH, T)}, \text{ lorsque } T > 0^\circ\text{C et } RH > 95\% \quad (2.8)$$

$$\Delta\alpha = -\frac{\Delta t}{17520}, \text{ autrement}$$

$$t_{crit}(RH, T) = \left[\frac{2,3T + 0,035RH - 0,024T \times RH}{-42,9 + 0,14T + 0,45RH} \right] \times 30 \times 24 \text{ [heures]} \quad (2.9)$$

Le deuxième processus nécessaire au calcul est celui de la perte de masse ML (%). Lorsque le paramètre α a atteint la valeur de 1, la perte de masse débute. Contrairement au processus d'activation, la perte de masse est irréversible et donc, ne décroît jamais. Il est possible de la calculer ainsi :

$$ML(t') = \int_{t \text{ à } \alpha=1}^{t'} \frac{ML(RH, T)}{dt} dt = \sum_{t \text{ à } \alpha=1}^{t'} \left(\frac{ML(RH, T)}{dt} \times \Delta t \right)$$

$$\frac{ML(RH, T)}{dt} = -5,96 \times 10^{-2} + 1,96 \times 10^{-4}T + 6,25 \times 10^{-4}RH \text{ [%/heure]} \quad (2.10)$$

Cette méthode peut être utilisée avec des données de température et d'humidité relative des composantes de bois d'un assemblage d'enveloppe issues de simulations qui tiendraient compte des données environnementales intérieures et extérieures comme conditions limites à l'assemblage. Bien que le modèle ait été développé pour estimer la dégradation du bois dans différentes parties de l'Europe, il est applicable pour estimer la dégradation du bois au Québec, en autant que les données climatiques soient disponibles [35].

La deuxième méthode, soit la modélisation de la germination des spores du champignon [34], combine deux modèles prédictifs, soit le modèle de l'isoplèthe et le modèle biohygrothermique transitoire. Le modèle de l'isoplèthe permet de déterminer le temps nécessaire à la germination des spores d'un champignon et le taux de croissance du mycélium selon différents types de champignons et de substrats. Les champignons sont divisés en trois catégories, soit ceux qui sont hautement dangereux pour l'humain et qui ne devraient pas être tolérés dans les habitations, ceux qui sont dangereux pour l'humain après une longue période d'exposition et

qui pourraient causer des réactions allergiques et finalement, ceux qui ne sont pas dangereux pour la santé, mais qui pourraient causer des dommages aux bâtiments. Puisque les spores de mэрule pleureuse seuls ne sont pas considérés à ce jour comme dangereux pour la santé humaine [36], c'est la dernière catégorie qui serait à prendre en compte dans les calculs pour ce modèle. Les substrats considérés par le modèle sont aussi divisés en trois catégories. La première catégorie comprend les matériaux biologiquement recyclables comme le papier et les matériaux de construction biodégradables. La seconde catégorie de substrats comprend les matériaux poreux minéraux, certaines essences de bois et les isolants non-inclus dans la première catégorie. La dernière catégorie regroupe les matériaux de construction qui ne sont pas biodégradables et qui ne contiennent aucun nutriment. Puisque les essences de bois visées par le projet ne sont pas classées comme résistantes à la dégradation biologique [37], c'est la première catégorie de substrat qui serait à prendre en compte dans les calculs. Le modèle biohygrothermique est combiné au modèle de l'isoplèthe pour pallier au fait qu'il ne prenne pas en compte les conditions changeantes de l'environnement dans lequel le champignon se développe. Ce modèle permet de calculer l'humidité dans un spore sous des conditions transitoires et donc, de considérer les moments où l'humidité ambiante ne serait pas suffisante pour contribuer à la croissance du champignon.

Ces deux méthodes permettent de prédire le développement des champignons dans le bois et le taux de dégradation du matériau et prennent compte des conditions changeantes des environnements intérieur et extérieur du bâtiment. Cependant, les résultats du calcul de perte de masse de la méthode de Viitanen et al. [35] peuvent servir indirectement à prédire la perte de résistance mécanique des pièces de bois de la structure dans le temps.

2.6 Essais mécaniques

Dans le but de récolter des données comparatives sur la capacité structurale du bois à différents niveaux de contamination, il est possible de réaliser des essais mécaniques sur les échantillons de bois. Plusieurs études ont montré que les propriétés mécaniques, comme le module d'élasticité (MOE), le module de rupture (MOR) ou encore la dureté, peuvent être affectées significativement avec une perte de masse minimale due à la pourriture [38], [39]. La pourriture peut diminuer les propriétés mécaniques du bois d'approximativement 10% avant même

qu'une perte de masse ne soit perceptible et que la dégradation ne soit visible à l'œil nu. Lorsque la perte de masse atteint entre 5% à 10%, les propriétés mécaniques peuvent être réduites de 20% à 80% [37]. En effet, dès les premiers signes de dégradation du bois due à la pourriture, la cellulose présente dans la structure du bois commence à être dépolymérisée [40]. La dépolymérisation de la cellulose contribue également à faire diminuer la stabilité dimensionnelle du bois [16]. Les travaux de recherche de Wilcox [38] indiquent que la force en flexion est plus sensible aux effets de la pourriture que la résistance en compression ou le cisaillement parallèle au grain. Les essais en flexion sont ainsi retenus dans le cadre du projet puisqu'ils permettent d'obtenir un MOE en flexion avec des essais non destructifs et un MOR avec des essais destructifs [41]. En ce sens, le MOE peut être déterminé de façon dynamique ou statique. Les méthodes statiques sont généralement normalisées. La norme ASTM D143-22 [42], entre autres, fait partie des procédures qui détaillent une méthodologie pour obtenir des données statiques standardisées. La norme ASTM D143-22 couvre les petits échantillons de bois dépourvus de défauts. Deux dimensions d'échantillons y sont suggérées, soit 50 mm x 50 mm x 760 mm ou 25 mm x 25 mm x 410 mm. Compte-tenu des échantillons récoltés pour le projet, les dimensions proposées et l'aspect sans défaut sont impossibles à respecter. De plus, sans amener les échantillons à la rupture, les méthodes statiques pourraient causer des dommages irréversibles aux échantillons qui seraient affectés par la pourriture [43]. En outre, les essais en flexion sont tout de même considérés fiables pour ce type d'échantillon [38], [39]. Sans respecter la norme directement et dans le but d'obtenir des données comparatives, la méthode peut être appliquée à de plus petits échantillons que suggérés s'ils sont tous de mêmes dimensions. Pour réaliser ces essais, il est possible d'utiliser la méthode de flexion en trois points. Pour ce faire, les échantillons sont positionnés sur deux appuis dans un système d'essai par entraînement électromécanique [44], puis un troisième appui vient poser une contrainte continue au centre de l'échantillon. Le déplacement engendré par la force appliquée permet de tracer la courbe de la contrainte par rapport à la déformation. Le MOE peut être calculé à partir de l'équation suivante [45] :

$$MOE = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot d^3 \cdot \Delta} \quad (2.11)$$

où F est la charge appliquée (N), L est la portée entre les deux appuis (m), b est la largeur de

l'échantillon (m), d est l'épaisseur de l'échantillon (m) et Δ est la flèche au centre de l'échantillon (m).

De son côté, le MOR peut être obtenu à partir du même essai, cependant les échantillons sont amenés jusqu'à la rupture. Le MOR peut être déterminé à partir de la formule suivante [45] :

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (2.12)$$

où F est la charge maximale appliquée au moment de la rupture (N), L est la portée entre les deux appuis (m), b est la largeur de l'échantillon (m) et d est l'épaisseur de l'échantillon (m).

Pour la réalisation des essais mécaniques, les échantillons de bois devraient avoir une teneur en humidité entre 8% et 12% dans le but de reproduire les conditions en service des composantes de bois dans un bâtiment [46].

Une alternative aux méthodes statiques se trouve dans les méthodes dynamiques. Les méthodes dynamiques sont groupées en deux catégories, soient par l'utilisation des ultrasons et par la résonance.

La première catégorie consiste à mesurer la vitesse d'onde d'ultrasons avec une paire de transducteurs piézo-électriques en contact avec les deux bouts d'un échantillon [47]. Le module d'élasticité (MOE) est calculé par la formule suivante :

$$V_u = L/t \quad (2.13)$$

$$MOE = V_u^2 \cdot \rho \quad (2.14)$$

où la vitesse de l'ultrason V_u (m/s) est égale à la longueur de l'échantillon L (m) sur le temps de propagation t (s) et ρ est la masse volumique de l'échantillon (kg/m^3).

Les méthodes par résonance, quant à elles, impliquent l'usage d'un marteau de masse proportionnelle à la taille des échantillons et d'un dispositif pour capter les sons. Le son généré par le coup du marteau sur l'échantillon est transmis à un oscilloscope. La plus grande fréquence obtenue par l'oscilloscope est celle qui est utilisée pour calculer le module

d'élasticité. Les essais de résonance peuvent se faire en flexion ainsi que longitudinalement.

En flexion, le module d'élasticité peut être déterminé en insérant la fréquence obtenue dans l'équation suivante [48] :

$$MOE = 0,946 \cdot \rho \cdot f^2 \cdot \frac{L^4}{h^2} \quad (2.15)$$

où MOE est le module d'élasticité (Pa), ρ est la masse volumique de l'échantillon (kg/m^3), f est la fréquence mesurée (Hz), L est la longueur de l'échantillon (m) et h son épaisseur verticale (m).

Le module d'élasticité obtenu par résonance longitudinale peut être déterminé à partir de l'équation suivante [47] :

$$MOE = 4 \cdot \rho \cdot f^2 \cdot L^2 \quad (2.16)$$

En raison des équipements disponibles et de la nature des échantillons, c'est la méthode statique de flexion à trois points qui est retenue pour les essais mécaniques.

2.7 Conditions aux limites – Données météorologiques

Un autre intrant nécessaire aux simulations hygrothermiques est la charge environnementale à laquelle les matériaux d'un assemblage d'enveloppe de bâtiment sont exposés. Une approche commune est d'utiliser une année de mesure considérée comme année référence [49]. Pour obtenir des données climatiques représentatives du climat d'un endroit donné, la pratique est de baser l'année de référence sur les données climatiques d'un minimum de 30 années précédant l'année d'intérêt [50]. Ces données climatiques se détaillent sous la forme de paramètres comme la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire, la quantité de précipitations, la vitesse et la direction du vent. Plusieurs méthodes sont recensées pour générer des années de référence selon des paramètres généraux. Ces méthodes peuvent être séparées en deux catégories, soit les méthodes dépendantes de la construction et les méthodes indépendantes de la construction. Les méthodes dépendantes de la construction tiennent

compte des effets des charges climatiques sur les assemblages d'enveloppe de bâtiment. Ainsi, plusieurs assemblages d'enveloppes différents doivent être simulés sous les mêmes conditions météorologiques afin de sélectionner une année de référence qui tient compte des effets du climat sur tous les assemblages simulés [51]. De leur côté, les méthodes indépendantes de la construction ne se basent que sur une analyse des données météorologiques de l'endroit visé par l'étude [52]. Le Tableau 2.2 recense quelques méthodes indépendantes de la construction pour choisir une année de référence.

Tableau 2.2 Méthodes indépendantes de la construction utilisées pour la sélection d'une année de référence

Nom de la méthode	Base pour la sélection des paramètres	Critères de sélection de l'année de référence
Méthode de l'indice d'humidité (Moisture Index (MI)) [53]	Potentiel de mouillage en prenant compte ou non de la pluie battante et potentiel de séchage	L'année avec la valeur de MI la plus proche de la valeur moyenne
Méthode du facteur Π (Π -factor method) [51]	Potentiel de mouillage et de séchage	L'année avec la plus petite valeur de facteur Π
Méthode de l'indice climatique et de l'indice RHT (Climatic and RHT Index) [54]	Potentiel de mouillage et de séchage	90 ^e centile
Méthode de la croissance de la moisissure (Mould growth method) [55]	Température extérieure et humidité relative	90 ^e centile

Ces méthodes sont différenciées entre autres par les paramètres pris en compte pour les définir et les critères de sélection de l'année type. Ainsi, tout dépendant de la nature de l'étude à réaliser, que ce soit pour analyser la durabilité d'un revêtement extérieur ou encore la demande

énergétique d'un bâtiment, l'année de référence pourrait changer. Puisque ces méthodes restent somme toutes aussi générales que leurs applications, des chercheurs de l'Université Concordia à Montréal se sont penchés sur une méthode de définition des paramètres de génération à l'aide d'une approche basée sur les données pour construire des fichiers météorologiques d'années de référence [56]. Cette étude vise à fournir un cadre méthodologique pour définir la génération de paramètres qui considèrent la disponibilité des données, l'application visée et le climat d'un projet. La méthode, qui utilise l'apprentissage automatique, est séparée en quatre étapes. À la première étape, les données climatiques historiques ainsi que l'application visée sont acquises et traitées. À l'étape 2, les données obtenues à la première étape sont évaluées en utilisant un arbre de régression qui identifie les paramètres météorologiques qui ont le plus d'incidence sur l'application visée. La troisième étape consiste à quantifier l'importance des paramètres météorologiques identifiés en leur accordant un poids selon l'application visée à l'aide d'un arbre de régression à gradient. La quatrième et dernière étape vise à générer le fichier météorologique de référence. Les résultats prometteurs de cette étude, de plus que la génération de paramètres et de poids spécifiques au projet et au climat de chacune des villes sélectionnées, font de cette méthode celle qui est retenue pour construire les années de référence utilisées dans le cadre du projet.

En plus du climat extérieur, la charge climatique intérieure doit être considérée dans les simulations hygrothermiques. La norme ASHRAE 160 [57] offre des tableaux de correspondance de température et d'humidité relative pour le climat intérieur en fonction de la température à l'extérieur. Les tableaux offrent l'option d'un bâtiment qui est chauffé seulement ou d'un bâtiment qui est chauffé et climatisé. Dans le cadre du projet, c'est un climat intérieur qui considère le chauffage uniquement qui est considéré.

Puisque la littérature scientifique spécifique aux conditions environnementales intérieures d'un vide sanitaire en climat québécois se fait rare, la recherche est élargie au nord de l'Europe. En effet, les travaux de Vanhoutteghem et al. [58] montrent que l'évolution de la température dans un vide sanitaire non chauffé au Danemark prend la forme d'une courbe qui s'apparente à une fonction sinusoïdale avec un sommet de température en été et un creux en hiver. Une autre approche similaire, mais par équations est utilisée par Laukkarinen et Vinha [59] pour le

sud de la Finlande. Cette approche est également une fonction sinusoïdale qui tient compte de la température annuelle moyenne extérieure et de l'amplitude de la variation au cours d'une année en fonction du temps. En utilisant les données climatiques des villes ciblées par l'étude au Québec, une fonction sinusoïdale semblable à celles décrites pour le Danemark et la Finlande peut être tracée pour définir l'environnement intérieur des vides sanitaires ciblés par la présente étude, i.e. non chauffé ni climatisé.

2.8 Sommaire

En résumé, cette section a présenté globalement la structure du bois, de l'échelle macroscopique jusqu'aux constituants chimiques. Le champignon mérule pleureuse est brièvement présentée avec un historique de son apparition en Amérique du Nord, ses conditions de croissance et son mécanisme de propagation. Différents outils de simulations hygrothermiques sont identifiés, puis des équations et méthodes de caractérisation des matériaux sont détaillées. Deux méthodes pour estimer la propagation d'un champignon dans le temps sont détaillées, soit celle de Sedlbauer [34] et celle de Viitanen et al. [35]. La pertinence de réaliser des essais mécaniques est discutée et des méthodes pour les exécuter sont présentées. Parmi ces méthodes se trouvent les essais dynamiques et statiques. Cette section se termine sur les méthodes communes pour générer des fichiers météorologiques de référence pour le climat extérieur, puis sur les méthodes utilisées pour déterminer les conditions environnementales à l'intérieur des bâtiments et dans les vides sanitaires.

Il n'y a aucune étude hygrothermique de la mérule pleureuse pour une construction à ossature de bois. Cette revue de la littérature s'est ainsi attachée à identifier les connaissances du bois et du champignons utiles pour élaborer ce projet et les méthodes expérimentales et de simulation qui peuvent être retenues pour cette investigation.

CHAPITRE 3

Complément méthodologique

Ce chapitre a pour but de détailler certains aspects méthodologiques du projet qui ne se trouvent pas dans le chapitre 4 du présent document.

3.1 Collecte du bois

Dans le but de répondre au second objectif spécifique du projet et de caractériser en laboratoire du bois contaminé et sain, des échantillons ont dû être prélevés sur le terrain. La collecte des échantillons a été réalisée dans sept résidences réparties sur le territoire de l'étude. Les contacts préliminaires avec les résidents se sont faits via l'association Mérule Québec, qui a fait une première sélection parmi ses membres. Le choix final a tenu compte des distances à parcourir, de la disponibilité des résidents et de la tenue ou non de travaux sur le bâtiment. Tel qu'entendu avec l'association, nous donnons simplement le nom de la région, sans plus de précision, pour chaque visite.

À chacune de ces résidences, le prélèvement a été fait de manière à avoir plusieurs sections d'une même composante de bois dans le but de comparer les propriétés du bois à différents niveaux de dégradation. Un des principaux enjeux de la collecte d'échantillons était de trouver des morceaux pouvant être prélevés qui n'auraient pas d'effet sur l'intégrité structurale du bâtiment. Une autre considération était de prélever des échantillons qui pouvaient être transformés mécaniquement pour la caractérisation en laboratoire. La Figure 3.1 montre un exemple de deux échantillons provenant d'une même composante, contaminés à différents niveaux.



Figure 4 Figure 3.1 Latte de mur recouverte par la mэрule pleureuse (haut de l'image) et non contaminée (bas de l'image)

Les visites par équipe de 2 à 3 personnes ont eu lieu de l'été 2022 au printemps 2023. Une fois sur place, la visite consistait à une courte prise de données auprès des résidents, d'une prise de mesures (température et humidité intérieures et extérieures), de la prise de photos et de l'extraction de spécimens. Tous les spécimens étaient mis dans l'étuve dès le retour au laboratoire de l'Université. Parmi les échantillons récupérés, quatre essences de bois ont été identifiées, soit l'épinette, le pin blanc, le sapin et la pruche. Compte-tenu du fait qu'un seul échantillon de pruche et un seul échantillon de sapin ont été récoltés et qu'ils ne peuvent être comparés avec eux-mêmes, les résultats de caractérisation physique et d'essais mécaniques présentés visent uniquement le pin blanc et l'épinette. Le Tableau 3.1 présente plus en détails les résidences visitées.

Tableau 3.1 Détail des résidences visitées pour la collecte des échantillons

Identification	Description	Photo
<p>Maison Centre- du-Québec 2022-06-07</p>	<p>Vide sanitaire sur la terre battue, mэрule développée à la jonction de la résidence principale et de son agrandissement. La source d'humidité provenait principalement d'une infiltration d'eau de pluie entre les deux parties de la maison. Lors de la visite, l'air dans le vide sanitaire était à une température de 21,5°C et l'humidité relative à 77,4%. Aucune donnée de teneur en eau pour le bois n'a été notée outre que le bois récolté autour de la contamination principale avait une teneur en eau excessive.</p>	
<p>Maison Côte- Nord 2022-07-27</p>	<p>Vide sanitaire sur la terre battue, mэрule développée sur les éléments structuraux et sous le plancher de l'espace de vie principal. Présence d'eau liquide au sol provenant sans doute d'une veine souterraine. Lors de la visite, la température de l'air du vide sanitaire était de 15,5°C et l'humidité relative de 95,6%. Aucune donnée de teneur en eau pour le bois n'a été notée.</p>	

<p>Maison Lanaudière 2022-11-12</p>	<p>Contamination du plancher du sous-sol à divers endroits, mais surtout au bas de la porte menant à l'extérieur. Le sous-sol est habitable, mais n'est pas chauffé toute l'année puisqu'il s'agit d'une résidence secondaire. Puisque le propriétaire nous avait préalablement sorti les échantillons du vide sanitaire, aucune donnée de température et d'humidité relative n'a été notée.</p>	
<p>Maison Bas-Saint-Laurent 2023-03-24</p>	<p>Sous-sol habitable sur dalle de béton, terrain en pente, infiltration saisonnière à la fonte des neiges et lors de fortes pluies. Gouttière qui ne permet pas l'éloignement de la pluie du bâtiment. La maison a subi plusieurs rénovations dans les dernières années, mais pas le sous-sol. Pas de drain français. Dans le sous-sol, la température était de 19,5°C et l'humidité relative de 79%. La teneur en humidité du bois mesurée variait entre 13 et 34%.</p>	

<p>Maison Capitale-Nationale 2023-03-27</p>	<p>Sous-sol habitable, infiltration d'eau due au blocage du drain extérieur du voisin. Le champignon s'est développé derrière le gypse, sur les lattes de bois en contact avec le mur de fondation en pierre. Dans la salle de bain du sous-sol, la température était de 15,4°C et l'humidité relative de l'air de 47%. À l'endroit du dégât d'eau, dans la salle de bain, le bois avait une teneur en humidité variant de 36 à 92%. Les matériaux étaient excessivement humides principalement sous la fenêtre au niveau du mur extérieur.</p>	
<p>Maison Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine 2023-04-04</p>	<p>Échantillons récoltés sous le portique de la maison et sur le sol du vide sanitaire en terre battue. Le portique sur pilotis avait été recouvert d'une tôle et la solive de rive du vide sanitaire avait été isolée au polyuréthane 2 ans avant l'apparition du champignon pour limiter les infiltrations d'air à l'intérieur du bâtiment. Lors de l'inspection, un ruissèlement d'eau vers le bâtiment et un manque de ventilation ont été notés pour le vide sanitaire. Lors de la visite des évaluateurs de la contamination, la</p>	

	<p>température du vide sanitaire était de 24,1°C et l'humidité relative était de 67%. La teneur en eau du bois du plafond variait entre 13,2 et 26,5% puis celle de la terre au fond du vide sanitaire était de 76,6 à 94,0%.</p>	
<p>Maison Laurentides 2023-04-27</p>	<p>Vide sanitaire complètement isolé au polyuréthane, infiltration d'eau entre la vieille partie de la maison et le salon d'été, à partir de la toiture. Le salon d'été n'est pas chauffé en continu l'hiver. Le polyuréthane a été giclé directement sur la terre battue humide. Le champignon était principalement situé sur le mur mitoyen entre la vieille partie de la maison et la nouvelle. Ventilation naturelle dans l'espace du vide sanitaire. Au moment de la visite, le bois avait une teneur en eau qui oscillait entre 11,3 et 12,3%. L'air ambiant dans le vide sanitaire était à une température de 5.9 °C et une humidité relative de 42,1%.</p>	

3.2 Simulations

Les simulations présentées dans l'article du chapitre 4 sont regroupées en trois phases. La première phase comprend des simulations pour les sept villes choisies selon deux scénarios. Le premier scénario considère les conditions environnementales intérieures et extérieures de référence avec un

vide sanitaire exposé à une température variable et une humidité relative constante à 80%. Le second scénario utilise les mêmes conditions pour l'intérieur et l'extérieur du bâtiment à l'exception du vide sanitaire qui est exposé à une humidité relative et une température variable. Dans ce deuxième scénario, une infiltration d'eau constante à $5 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3\text{s}$ est simulée entre la solive et la lisse basse, juste au-dessus du mur de fondation pour reproduire une infiltration d'eau à long terme. L'hypothèse que cette source d'eau ne subit pas les effets du gel a été émise. L'entièreté de ces simulations sont faites pour le pin et l'épinette, puis pour un vide sanitaire isolé au polyuréthane et non-isolé pour un total de 56 simulations. Ces simulations servent à déterminer quelles régions de la province ont le plus grand risque de dégradation dans des conditions propices à la croissance de la mérule pleureuse. La Figure 3.2 montre la schématisation de la Phase 1.

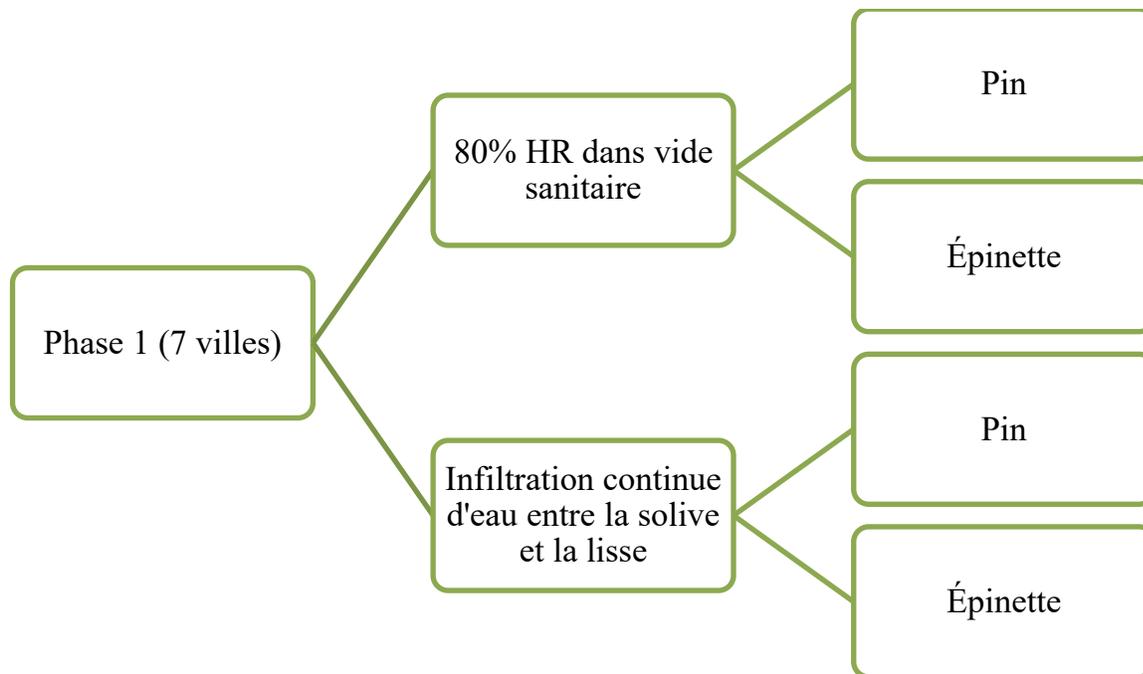


Figure 3.2 Schématisation de la Phase 1

La deuxième phase de simulation reprend le scénario où la perte de masse en post-traitement est la plus grande. Dans cette phase, les propriétés du bois caractérisées en laboratoire sont intégrées manuellement au modèle en cours de simulation au fil de la dégradation. Ainsi, il est possible d'avoir un aperçu de l'effet de la dégradation par la mérule pleureuse sur les transferts d'humidité et de chaleur dans le bois. Cette phase de simulation est réalisée pour deux villes, soit Montréal et Sept-Îles pour du bois d'épinette. La Figure 3.3 montre la schématisation de la Phase 2.

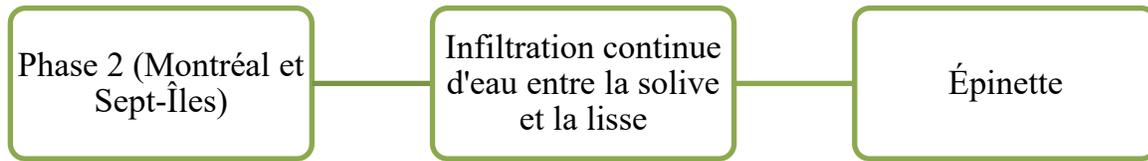


Figure 3.3 Schématisation de la Phase 2

Le troisième phase est construite selon la même méthodologie que la deuxième. Le même principe de changement de propriétés s’y applique, cependant, des sources d’eau sont ajoutées dans le bois à mesure que le champignon évolue pour simuler le transport d’eau qui serait fait par le cordons mycéliens. La quantité d’eau apportée par ces sources est fixée à $3,89 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$ [18]. Tout comme pour la seconde phase de simulation, cette phase est réalisée pour Montréal et Sept-Îles pour du bois d’épinette. La Figure 3.4 montre la schématisation de la Phase 3.

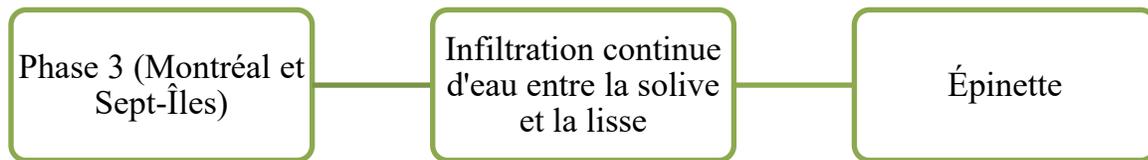


Figure 3.4 Schématisation de la Phase 3

3.3 Propriétés du bois

Les propriétés du bois utilisées dans les simulations sont dérivées de propriétés du bois disponibles dans Delphin. Les échantillons caractérisés en laboratoire ont tous été classés selon leur niveau de dégradation observable à l’œil nu, soit sain, contaminé et très contaminé. Les pourcentages d’écart obtenus entre les moyennes par catégories pour chacune des propriétés ont été rapportés aux valeurs disponibles dans Delphin.

CHAPITRE 4

Hygrothermal characterization and performance of wood in assemblies accounting for contamination by *Serpula lacrymans*

4.1 Avant-propos

Auteurs et affiliation :

Camille Roy : étudiante à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil et du bâtiment.

Anahita Bigtashi : étudiante au doctorat, Université Concordia, CZEBS, Génie du bâtiment.

Dominique Derome : professeure, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil et du bâtiment.

Caroline Frenette : professeure associée, Université du Québec à Rimouski, Département de génie et d'informatique.

Date de soumission : 26 avril 2024

Revue : Journal of Building Physics

Titre français : Caractérisation hygrothermique et performance d'assemblage de bois contaminés par la mэрule pleureuse

Contribution au document : Camille Roy a contribué à 90% sur toutes les étapes du travail présenté. Cette article présente le développement de la méthodologie détaillée, la production de tous les résultats et leurs analyses, et les conclusions permettant d'atteindre le premier, le second et le dernier objectif spécifique du projet afin de fournir les éléments nécessaires à l'atteinte de l'objectif principal du projet de recherche. Anahita Bigtashi a produit les 7 fichiers météo requis pour les simulations. Dominique Derome et Caroline Frenette ont conçu le projet, obtenu le financement et encadré étroitement et régulièrement Camille Roy.

Résumé français : Certains champignons qui dégradent le bois sont de plus en plus présents au Québec, Canada, et cette augmentation semble coïncider avec les changements climatiques. La

mérule pleureuse est un champignon de pourriture brune qui est l'un des champignons les plus destructeurs signalés dans la province. Cet article documente et simule la propagation de la biodégradation dans les bâtiments à ossature bois et, plus spécifiquement, étudie cette propagation en tenant compte de l'impact de la contamination des composantes en bois par la mérule pleureuse sur la performance hygrothermique des assemblages de murs à ossature bois. Le travail présenté comporte deux volets.

Premièrement, nous évaluons les propriétés physiques et mécaniques du bois de pin et d'épinette dégradé par la mérule pleureuse. La masse volumique, la porosité, la perméabilité à la vapeur d'eau, la sorption de la vapeur d'eau, l'absorption capillaire de l'eau, la teneur en eau à la saturation capillaire et à la saturation effective ont été mesurées pour fournir un aperçu comparatif du bois sain et du bois contaminé. Les échantillons dégradés ont montré une augmentation de leur facteur de résistance à la vapeur d'eau et de leur teneur en eau à la saturation capillaire, ainsi qu'une diminution générale des valeurs des isothermes de sorption et des coefficients d'absorption capillaire de l'eau. Les valeurs de saturation effective étaient plus élevées pour les échantillons d'épinette dégradés et plus faibles pour les échantillons de pin dégradés. Les propriétés mécaniques testées étaient le module d'élasticité et le module de rupture avec des essais de flexion à trois points. Les résultats ont montré que, même si la perte de masse mesurée est négligeable, la perte de résistance mécanique peut être considérable.

Deuxièmement, nous évaluons comment la présence de bois endommagé affecte la performance hygrothermique de différents assemblages d'enveloppes pour sept sous-régions climatiques du Québec. Le critère de dégradation est basé sur la durée d'exposition à des niveaux d'humidité et de température propices à la croissance fongique. La mérule pleureuse possède une capacité particulière par rapport à d'autres champignons de décomposition, dans le sens que le champignon peut déplacer sa source d'eau vers les nutriments recherchés. La présence et la répartition du champignon dans les enveloppes sont donc modélisées par deux moyens : les propriétés modifiées de transport de l'eau obtenues à partir de mesures en laboratoire sur du bois contaminé et l'ajout de chemins parallèles dans les composantes de bois pour simuler le transfert d'humidité dans les enveloppes. Pouvoir prévenir les dommages causés par la mérule pleureuse dans les délais appropriés pourrait permettre d'éviter la démolition de certains bâtiments, contribuant ainsi à la résilience de l'environnement bâti face aux changements climatiques.

Note : À la suite des corrections demandées par les membres du jury, le contenu de cet article

diffère de celui qui a été soumis. Les résultats des simulations présentés dans l'article ne sont qu'un sommaire de tous les résultats obtenus dans le projet. L'Annexe A présente la totalité de ces résultats en complément à ce qui est exposé dans l'article.

4.2 Abstract

Some wood-destroying fungi are increasingly present in Québec, Canada, and this reported increase seems to coincide with climate change. *Serpula lacrymans* is a brown rot fungus that is one of the most destructive fungi reported across the province. This paper documents and simulates the spread of biodegradation in wood-framed buildings and, more specifically, investigates this spread considering the impact of *S. lacrymans* contamination of wood components on the hygrothermal performance of wall assemblies. The work presented is two-pronged.

First, we assess physical and mechanical properties of pine and spruce wood degraded by *S. lacrymans*. Density, porosity, water vapor permeability, water vapor sorption, capillary water absorption, water content at capillary saturation and effective saturation have been measured to provide comparative insight for healthy and contaminated wood. Degraded samples showed an increase in their water vapor resistance factor and water content at capillary saturation as well as a general decrease in values of sorption isotherms and capillary water absorption coefficients. Effective saturation values were higher for degraded spruce samples and lower for degraded pine samples. The mechanical properties tested were the elastic modulus and the modulus of rupture with three-point bending tests. Results showed that, even if the measured mass loss is negligible, loss of mechanical strength can be considerable.

Second, we assess how the presence of damaged wood affects the hygrothermal performance of different envelope assemblies for seven climatic sub-regions in Québec. The degradation criterion is based on the duration of exposure to humidity and temperature levels conducive to the fungal growth. *S. lacrymans* has a particular ability compared to other decay fungi in that it can move water source towards sought nutrients. Hence, fungal presence and distribution in the envelope assemblies is modeled with two means: modified water transport properties obtained from laboratory measurements on contaminated wood and addition of water flux in wood components to simulate hyphae-borne moisture transfer in the assemblies. Being able to prevent damage caused by *S. lacrymans* in the appropriate timeframe could help avoid the demolition of certain buildings, contributing to the resilience of the built infrastructure in the face of climate change.

Keywords: S. lacrymans, fungi-contaminated wood, property characterization, hygrothermal performance, wood-framed assemblies

4.3 Introduction

Serpula lacrymans is a fungus which degrades the cellulose in wood, leading to dry rot [13]. *S. lacrymans* intolerance to sudden changes in temperature, light or wind explains that the fungus is mostly found inside buildings, rather than in nature [15]. Probably in relation to climate change, wood degrading agents, *S. lacrymans* being one of them, that historically did not survive in the climate of Québec, Canada, can now establish themselves. Government agencies have reported a lack of technical knowledge to manage the problem [2]. Available statistics on recorded cases of *S. lacrymans* in Québec document the increase. According to the Canadian Forest Service, 18 cases were reported in Québec between 1947 and 1995 [60]. Although it is not mandatory in Québec to report cases of *S. lacrymans*, 243 cases have been reported in the province since 2014 [61]. The discovery of a building contaminated by *S. lacrymans* requires the owners to take action promptly as once established this fungus can attain the rapid growth of 0.3 cm per day [62]. Measures against this serious situation involve either decontamination or demolition, both costly. Particularly troublesome is the coincidence of such contamination following energy retrofit interventions. Over the last decades, to limit energy losses, many buildings with crawl spaces have had their foundations and subfloors insulated from the inside. This insulation technique could increase certain damage risks, including rotting of wood behind insulation. Increasing knowledge of the risks associated with wood-framed building contamination by *S. lacrymans* in Québec under different environmental contexts, is crucial to better preventing contamination and reacting in the event of its occurrence.

Although previous work has looked at the interactions of wood degraded by decay fungi with water over the years, the conclusions drawn stem from a limited array of fungi and wood species [32], [63], [64], [65]. There is therefore a need to deepen this knowledge specifically for the *S. lacrymans* fungus in terms of the cause and impact of its presence on further spreading, towards limiting the financial and technical impact on owners. To do so, a campaign was put in place to collect wood specimens in contaminated buildings across Québec. Healthy and contaminated wood specimens of *S. lacrymans* have been characterised to provide insight on the behavior of wood framed assemblies exposed to different indoor and outdoor environments.

This paper presents a characterization of site-collected sound and contaminated wood and uses the observed properties to evaluate their impact on hygrothermal performance of wood-framed systems. We present the methods and the results of the physical and mechanical characterization of the wood samples. The contaminated wood samples data is then compared to healthy wood data. The discussion focuses on the main differences observed in two wood species for the three different contamination levels. To gain a better understanding of the impact of the deterioration caused by the growth of *S. lacrymans* on wood-framed building assemblies in Québec, hygrothermal simulations are used to document the temperature, relative humidity, and moisture content of wood elements in different insulation configurations, climates, and levels of fungal degradation. A simulation approach to ascertain the impact of contaminated wood within assemblies is developed and presented using own-developed moisture year of seven cities. The results are presented and discussed with an analysis highlighting the impacts of the different simulation parameters, within this study limitations. Finally, the conclusion summarizes the work done and presents some avenues that could be explored further for this type of contamination.

4.4 Methodology

4.4.1 Characterization of damaged wood

Specimens of contaminated wood, collected directly from affected homes spread over the Québec territory, were experimentally characterized. The wood species studied were pine and spruce. These two wood species have been the most common species used in residential construction in Québec [3]. For sample collection, potential buildings were preidentified via two avenues, through decontamination companies which had obtained the customers' agreements, and through Mérieux Québec, a non-profit support organization for home owners faced with such situation [66]. Building owners were contacted and agreed to the specimen collection. The specimens had to meet 2 criteria: they had to be large enough to produce the cut samples required by the different tests, and they had to include three levels of degradation, i.e. a sound-looking part, a part partially covered by the fungus and a part completely covered. After consideration, we retained seven houses for site visit and collection of wood specimens for the project. At each site, the occupants were interviewed to determine the timeline of events, photos documented the collection site and measurements were done. For specimen collection, the protective protocol involved a full suit, gloves, mask, and

goggles. To transport the specimens to the laboratory, a double bagging protocol was followed. Prior to characterization, specimens were oven dried at 80°C for at least two weeks. Visits took place between June 2022 and April 2023. A total of 14 specimens were collected and 12 of these were retained for full characterization as the advanced degradation level of the two specimens from Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine prevented viable samples for characterization to be produced. Seven specimens came from inhabitable basements, three from an insulated crawl space et two from uninsulated crawl spaces. Figure 4.1 presents photos of the samples used for the physical characterization.

Table 4.1 Specimens used for the project with dimensions, provenance (administrative region) and date of site visit

<p>P1</p>  <p>Pine, approx. 180 x 15 x 2 cm³, inhabitable basement, Lanaudière, 2022-11-12</p>	<p>P2</p>  <p>Pine, approx. 60 x 15 x 2 cm³, inhabitable basement, Lanaudière, 2022-11-12</p>	<p>S1</p>  <p>Spruce, approx. 60 x 6 x 2 cm³, inhabitable basement, Bas-Saint-Laurent, 2023-03-24</p>
<p>S2</p>  <p>Spruce, approx. 45 x 6 x 2 cm³, inhabitable basement, Bas-Saint-Laurent, 2023-03-24</p>	<p>S3</p>  <p>Spruce, approx. 100 x 6 x 2 cm³, inhabitable basement, Bas-Saint-Laurent, 2023-03-24</p>	<p>S4</p>  <p>Spruce, approx. 20 x 9 x 2 cm³, inhabitable basement, Capitale-Nationale, 2023-03-27</p>
<p>S5</p>  <p>Spruce, approx. 25 x 9 x 2 cm³, inhabitable basement, Capitale-Nationale, 2023-03-27</p>	<p>S6</p>  <p>Spruce, approx. 30 x 15 x 2 cm³, insulated crawl space, Laurentides, 2023-04-27</p>	<p>S7</p>  <p>Spruce, approx. 30 x 15 x 2 cm³, insulated crawl space, Laurentides, 2023-04-27</p>
<p>S8</p>  <p>Spruce, approx. 30 x 15 x 2 cm³, insulated crawl space, Laurentides, 2023-04-27</p>	<p>S9</p>  <p>Spruce, approx. 30 x 15 x 2 cm³, uninsulated crawl space, Côte-Nord, 2022-07-27</p>	<p>S10</p>  <p>Spruce, approx. 20 x 9 x 2 cm³, uninsulated crawl space, Centre-du-Québec, 2022-06-07</p>

Measurements on the samples included density, porosity, water vapor permeability, water vapor sorption, capillary water absorption, and water content at capillary saturation. These properties provide the basis upon which the fungus-contaminated wood material properties used in hygrothermal simulations are formulated. As many studies have shown that mechanical properties, such as the modulus of elasticity (MOE) and the modulus of rupture (MOR), can be significantly affected by rot [13, 14], mechanical tests were also performed. Most physical properties have been characterized on dry wood under isothermal conditions in a laboratory with conditions maintained around 23°C and 20-25% relative humidity (RH), unless mentioned otherwise.

Density

The bulk density (ρ in [kg/m³]) of the samples was determined by the ratio of their dry mass to their dry volume prior to tests.

Porosity

Porosity (ϕ_0) was calculated by subtracting the volume of the porous material occupied by cell wall to the total volume. The density of cell wall is taken as 1500 kg/m³ [67].

$$\phi_0 = 1 - \frac{\rho_{porous\ material}}{\rho_{cell\ wall}} \quad (3)$$

Permeability

The water vapor permeability of the samples was measured using permeability cells (wet cup/dry cup), here aluminum container of 50 mm radius, with water to obtain near 100% RH in the cell. The cell was covered with a wood disc-shaped sample of 8mm thickness. The perimeter of the sample was sealed with bee wax to ensure unidirectional moisture flow. The cells were installed in a desiccator cabinet with a relative humidity of 19.3% RH. Figure 4.5a shows a permeability cell. The change in mass of the cell over time gives a flux for a permeable material considering its area and thickness as installed in the cell. The permeability (δ [s]) is calculated as follows:

$$\delta = \frac{d}{A} \frac{g_v}{\Delta p_v} \quad (4)$$

where,

g_v = cell mass difference in time (kg/s)

d = wood specimen thickness (m)

A = exposed area (m²)

Δp_v = vapor pressure difference (Pa)

The water vapor resistance factor (μ) is obtained by the ratio of the water vapor coefficient in dry air δ_a of approximately 1.87×10^{-10} s at 20°C and material vapor permeability δ as follows:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (5)$$

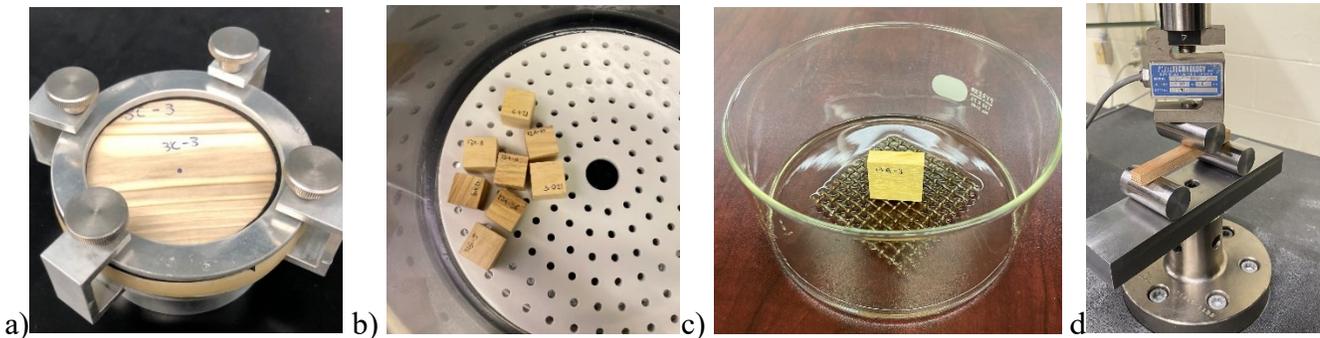


Figure 4.5 a) Permeability cell with wood sample, b) Lithium chloride solution in desiccator, c) Set-up for imbibition test, d) Set-up for three-point bending test

Water vapor sorption isotherms

Water vapor sorption isotherms were acquired using a series of seven desiccators, with water, desiccant, or saline solutions to control relative humidity towards obtaining the sample mass at equilibrium with environments of varying relative humidities. These environments and their RH were as following: lithium chloride (12% RH), magnesium chloride (33% RH), magnesium nitrate (54% RH), sodium nitrate (65% RH), sodium chloride (75% RH), potassium chloride (85% RH) and water (100% RH). Figure 4.5b displays a desiccator used to condition samples at the desired relative humidity. Samples were $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$. Water content (MC) of samples, expressed as $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry wood}} \%$, is calculated with the following equation:

$$MC = \frac{m_h - m_d}{m_d} \times 100 \quad (6)$$

where,

m_h = moist sample mass (kg)

m_d = dry sample mass (kg)

Capillary water absorption, water content at capillary saturation and effective saturation

Capillary water uptake coefficient (A_{cap} in $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})]$) was measured by imbibition where a wood sample was put in contact with liquid water and the mass increase over a determined period of time monitored. Uptake in three grain directions was tested for most samples. Samples were $30 \times 30 \times 10 \text{ mm}^3$. Water content at capillary saturation (w_{cap} in $[\text{m}^3/\text{m}^3]$) was determined, from the liquid uptake results plotted in function of square root of time, as the point of intersection of the first slope of uptake and the final slope. Effective saturation (w_{sat} in $[\text{m}^3/\text{m}^3]$) was measured as the maximum mass value reached at the end of the experiment, which is chosen long enough to effectively approach water saturation. Figure 4.5c shows an example of an imbibition test set-up.

Mechanical properties

With the aim of documenting damage as a complement to physical characterization, mechanical strength tests were performed to obtain comparative data on the structural capacity of the wood specimens at different levels of contamination. Three-point bending tests were conducted on a series of contaminated and healthy samples to determine modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) values (in $[\text{MPa}]$). The samples were conditioned to 12% MC to represent the upper bound of indoor service conditions. Due to the constraints imposed by the geometry of the original samples, mechanical tests were carried out on longitudinal samples. Samples were 100 mm long (longitudinal direction), 8 mm thick and wide (radial and tangential directions). The level of degradation of cut samples is not necessarily the same as the overall level of contamination of the specimen. The span between lower supports was 80 mm. The loading support was fixed, and the diameter of the roller bearings was 25.4 mm. The tests were conducted at a rate of 2 mm/min using an Instron 4482 apparatus. Figure 4.5d shows the set-up for three-point bending tests.

MOE values are determined by the following equation:

$$MOE = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta} \quad (7)$$

where,

F = applied load (N)

L = span between two supports (m)

I = sample moment of inertia (m⁴)

Δ = deflection at sample centre (m)

MOR values are determined by the following equation:

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (8)$$

where,

F = applied load at fracture point (N)

b = sample width (m)

d = sample thickness (m)

4.4.2 Parametric hygrothermal evaluations of assemblies with contaminated wood

The assembly modeling consisted in the junction of an exterior wall and interior floor resting on a concrete foundation. Two scenarios of loading conditions, presented in detail below, were retained for the simulations. Scenario 1 aimed to simulate the wall assembly under typical climates and indoor crawl space conditions with fluctuating temperature while relative humidity is maintained at 80% RH, in line with relative humidity measurements in contaminated houses. Scenario 2 had the same exterior climate, but two variations: crawl space temperature and relative humidity fluctuating with exterior conditions, and the addition of a constant water leak between the header joist and the sill plate resting on the concrete foundation. It should be noted that, in this second scenario, water infiltration is continuous and hypothetically unaffected by frost. In addition to the basic configuration *a*, a second configuration *b* accounts for indoor sprayed-applied thermal insulation in the crawl space.

Simulation setup

Hygrothermal simulations were conducted with the software Delphin 6.1.6 [25]. The initial conditions for temperature and RH for all materials were respectively set to 20 °C and 80%. Anisotropic transport modeling was activated to allow the use of longitudinal and transverse properties. Simulations were performed with the same weather file applied five consecutive times.

Outdoor climates

Seven cities were selected across Québec as representative climatic subregions. Also, these cities had 30 years of climate data available from airport weather stations [68], actually measured between 1991-2020. City locations and indicative climatic characteristics are shown in Table 4.2. Typical meteorological year weather files were constructed using a data-driven approach [56]. The methodology uses feature importance to define the generation parameters used in the Sandia National Laboratories method [69], [70] to generate typical meteorological year weather files. To adequately adapt the methodology for different applications, the training input dataset must include the weather parameters used by the selected simulation software. As a result, rain precipitation was added to the list of features used to train the machine learning regression model. Furthermore, to tailor the weather files to the given study, the overall header joist temperature simulated for five years was used as the training output dataset. The selected weather parameters (temperature (°C), relative humidity (%), direct radiation normal (W/m^2), diffuse radiation horizontal (W/m^2), wind direction (deg), wind velocity (m/s), longwave counter radiation (W/m^2), air pressure (Pa), rain (l/m^2h)) and the resulting weighting factors obtained from the model using feature importance were incorporated into the Sandia method to construct the weather files. More detailed information on the methodology is found in [18].

Table 4.2 Location, average January and July air temperatures and annual rain loads for the seven selected cities.

City	Weather station ID	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Average temperature for January (°C)	Average temperature for July (°C)	Annual rain load (l/m ²)
Jonquière	7063370	48.43	-71.14	135	-14.7	17.9	927
Montréal	7025251	45.47	-73.74	36	-6.0	21.7	957
Ottawa (ON)	6106001	45.32	-75.67	114	-7.4	21.1	856
Québec City	7016293	46.80	-71.38	74	-11.9	19.8	1303
Rivière-du-Loup	7056616	47.81	-69.55	146	-11.4	17.5	813
Rouyn-Noranda	7086716	48.25	-79.03	318	-11.8	18.5	830
Sept-Îles	7047911	50.22	-66.27	54	-11.7	15.3	1154

Indoor and crawl space conditions

Scenario 1 needed indoor temperature and Scenario 2 needed indoor temperature and RH to be calculated for each city according to the tables provided by ASHRAE 160 [57]. Indoor temperature was calculated using the 24h running average with heating only. Hourly RH values were calculated based on the simplified method provided by ASHRAE 160. Using the outdoor weather files from the seven cities processed for this study, a sine function was plotted to define the indoor conditions of the crawl spaces [58], [59]. The functions consider the annual average outdoor temperature, the temperature amplitude of a year and the time of the year.

Base wall assembly configuration

As wood decay by water-conducting fungi is frequently observed to begin in crawl spaces and basements in houses [71], a wood-framed wall assembly typical of residential building practices in the province of Québec for the 1950-1980 period is selected for this study (Figure 4.6). As mentioned above, two insulation configurations were simulated for the crawl space: no insulation (configuration *a*) and a layer of 32 mm of polyurethane foam covering the foundation wall and the sub floor area (configuration *b*). It is assumed that the cedar siding is untreated and unpainted, and that the OSB acts as a vapour barrier. Figure 4.6 presents the composition of the wall assembly.

With two scenarios and two configurations, we obtain four loading conditions: scenarios 1a, 1b, 2a and 2b.

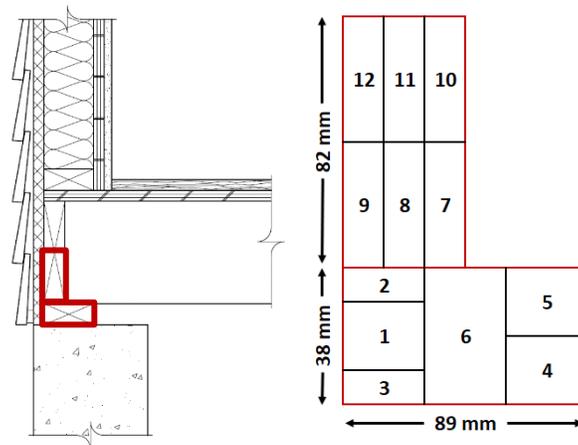


Figure 4.6 a) Schematic representation of wall assembly, highlighting the zones of interest, b) Subdivision of header joist and wall plate into 6 zones each.

Table 4.3 Composition of the assemblies

Wall Assemblies	Layers
Wall	Gypsum board / Wooden laths / Mineral wool / Spruce or pine studs / Wall sheathing / Air gap / Cedar cladding
Foundation wall	Concrete
Floor	Plywood / Subfloor planks / Spruce or pine joists
Configuration variants	a) No insulation / b) Polyurethane insulated floor and foundation wall

Development of the simulation protocol

The aim of this project was to analyze the influence of changes in wood properties due to decay by *S. lacrymans* on the results of hygrothermal simulations. However, such degradation, i.e. loss of mass, was calculated as a post-processing step in Delphin. Hence, a Scenario was applied here as a series of simulations, implementing step changes in material properties as per mass loss. The simulation scenarios detailed above were first simulated with sound wood properties, to target areas of decay over time (Phase 1). In a second simulation phase, at the appropriate moment, the calculation in progress was interrupted and the properties of the degraded wood, as characterized

in laboratory, were integrated into the model. It was then possible to continue the simulation with the modified properties to observe their impact on temperature, relative humidity, and moisture content in targeted wood components (Phase 2). In a third simulation phase that reused this approach, water paths were added throughout the degradation process to simulate water transport in *S. lacrymans* hyphae (Phase 3), with water source added to the contaminated parts following the changes in properties. The water flux is set to be a constant $3.89 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3\text{s}$ [18].

To better follow the hygrothermal performance within the assembly junction, the header joist and the sill plate are divided into 12 zones of interest (Figure 4.6).

Mass loss

The mass loss discussed in this article is calculated in post-processing from Viitanen rot degradation model [35]. This model is based on laboratory experiments on pine sapwood using two decay fungi, the *Coniophora puteana* and the *Gloeophyllum sepiarium*, which are basidiomycetes and lignivorous like *S. lacrymans*. Since the methodology of the project is parametric and thus aims to be comparative in nature, it is assumed that the results obtained with the VTT model in post-processing are adequate to document such parametric study.

4.5 Results and discussion

4.5.1 Characterisation of contaminated wood

Hygrothermal properties

The results in Table 4.4 summarize the physical properties of the characterized wood samples. As several samples from the same specimen could be produced with dimensions appropriate for a specific test, the number of specimens is given. For tests with more than 6 samples, the standard deviation is included.

The measured water vapor resistance factor is higher for contaminated pine samples (P1) than for healthy samples (P2). A_{cap} and w_{sat} values are higher for the healthy samples. w_{cap} values are lower for healthy samples. From this experiment, it is not possible to draw conclusions according to the pine sorption isotherms as samples of both levels of contamination follow a similar tendency (Figure 4.7). The most visually degraded spruce samples are the ones with the highest water vapor resistance factor (S6, S8, S9) and the highest theoretical porosity (S6-S10). The w_{sat} values are

higher for degraded samples unlike for pine. As with pine, w_{cap} values are lower for healthy samples. A_{cap} values, for their part, are on average higher for healthy samples. Regarding moisture sorption, the most visually degraded samples are those with the lowest sorption isotherms (S6-S10).

Table 4.4 Physical properties of pine and spruce of 3 contamination levels

specimen ID	contamination level*	ρ (kg/m ³)	ρ , standard deviation	ρ , no. of samples	μ	μ , no. of samples	porosity (m ³ _{pores} /m ³ _{wood})	ϕ_0 , standard deviation	ϕ_0 , no. of samples	w_{cap} (m ³ _{water} /m ³ _{wood})	w_{cap} , no. of samples	w_{sat} (m ³ _{water} /m ³ _{wood})	w_{sat} , no. of samples	A_{cap} long. (kg/m ² s ^{1/2})	A_{cap} long., no. of samples	A_{cap} radial (kg/m ² s ^{1/2})	A_{cap} rad., no. of samples	A_{cap} tangential (kg/m ² s ^{1/2})	A_{cap} tang., no. of samples
P2	C1	319.7	25.1	20	12.35	2	0.79	0.02	20	0.22	5	0.41	5	0.037	10	-	0	0.007	1
P1	C3	333.1	20.8	51	13.07	8	0.78	0.01	51	0.37	1	0.38	1	0.032	6	0.018	4	-	0
S2	C1	440.0	18.9	19	14.42	2	0.71	0.01	19	0.36	2	0.45	2	0.058	6	0.033	2	0.045	5
S5	C1	505.1	13.0	12	15.69	2	0.66	0.01	12	0.36	2	0.46	2	0.028	5	0.009	2	-	0
S1	C2	484.9	70.6	21	15.96	2	0.68	0.05	21	-	0	-	0	0.022	3	0.011	1	0.009	1
S3	C2	512.7	30.2	19	14.91	4	0.66	0.02	19	-	0	-	0	-	0	0.015	3	0.013	1
S4	C2	441.9	22.3	21	15.25	2	0.70	0.01	21	0.27	1	0.50	1	0.021	5	-	0	0.007	2
S7	C2	424.9	75.9	14	16.74	3	0.71	0.05	14	0.42	2	0.51	2	0.037	1	0.012	1	-	0
S6	C3	407.1	42.0	18	25.00	1	0.73	0.03	18	-	0	-	0	0.027	3	0.009	2	-	0
S8	C3	380.5	22.3	15	22.91	3	0.74	0.02	15	0.51	2	0.63	2	0.014	5	0.009	3	0.011	2
S9	C3	427.7	59.1	7	20.67	1	0.72	0.04	7	0.53	1	0.65	1	0.050	1	-	0	-	0
S10	C3	399.8	44.8	13	-	0	0.73	0.03	13	-	0	-	0	-	0	0.008	3	0.009	3

*Contamination level: C1 = None or few signs of contamination, C2 = Moderate signs of contamination, C3 = High level of contamination

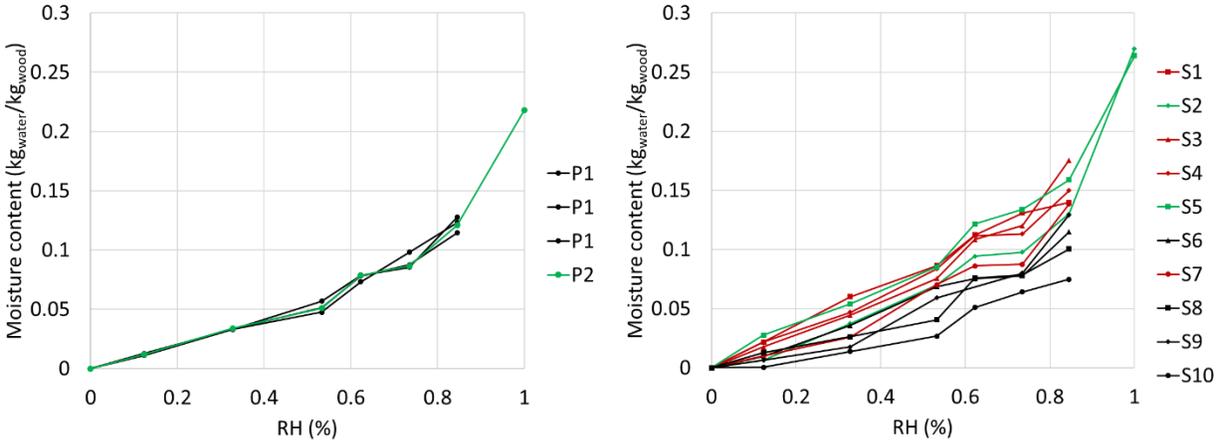


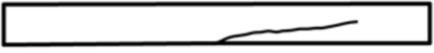
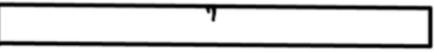
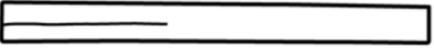
Figure 4.7 Pine and spruce sorption isotherms, with levels of contamination C1 in green, C2 in red and C3 in black.

The decay generated by *S. lacrymans* incurs significant changes in the chemical composition of wood. In the early stages of wood degradation, when the hyphae penetrate the cell walls, the cell walls are depolymerized. The number of sorption sites, i.e. free hydroxyl groups -OH, then increases. However, as degradation increases the number of sorption sites decreases [72], [73], [74]. The majority of free -OH groups found in wood cell walls are found on hemicellulose and amorphous cellulose [8]. Since *S. lacrymans* degrades the cellulose in the wood, it is normal to observe a reduction in sorption capacity of highly degraded samples. This decay process causes the cell walls to shrink, forming cracks [75]. Brown rot fungi, such as *S. lacrymans*, degrade wood in that way where wood pores become larger the more wood is degraded [76]. A bigger pore radius implies a lower capillary pressure. This could partly explain an A_{cap} value that is lower for decayed wood. The further degradation progresses, the more mycelium is found in the wood cells, as seen by computer tomography. This in turn increases resistance to the passage of water vapor in contaminated materials. As this new material transforms the pore network, capillary saturation is seen to increase in contaminated wood.

Mechanical properties

For mechanical testing, samples cut from specimens were categorized according to the specimen's overall level of contamination. The level of contamination of each specimen may vary.

Table 4.5 Types of failure for pine and spruce samples [42, with permission]

Type of failure as per ASTM D143-22	Number of pine samples	Number of spruce samples
 (a) Simple Tension. (Side View)	9	1
 (b) Cross-Grain Tension.* (Side View)	11	-
 (c) Splintering Tension. (View of Tension Surface)	22	37
 (d) Brash Tension. (View of Tension Surface)	-	8
 (e) Compression. (Side View)	-	-
 (f) Horizontal Shear. (Side View)	-	5

We first report the types of failure observed as categorized in [42].

Table 4.5 provides the number of events observed per type of failure. Splintering tension failure is the most commonly observed type and is observed on the two species, on samples with MOR ranging from 38.4 to 95.0 MPa. Simple tension is also observed in both species with MOR values ranging respectively from 52.3 to 69.9 MPa. Brash failure mode was observed only in spruce samples on the specimens with the lowest MOR values recorded (i.e., less than 25.8 MPa). Cross-grain tension was only found in the pine samples with MOR values ranging from 27.5 to 49.2 MPa. Horizontal shear only happened with spruce samples with MOR values between 72.4 to 92.4 MPa. The moduli of elasticity and rupture of the characterized wood samples are listed in Table 4.6. We remind that the mechanical tests were carried out with a length/width ratio of 10 to extract the maximum number of samples from the contaminated wood pieces, whereas this ratio should have been 14 to comply with ASTM D143-22 [42]. However, this modification does not prevent the discussion of the results. The following figures have been drawn to better understand the influence of contamination on mechanical strength in relation to wood density. Figure 4.8 show that, for healthy pine samples, the greater the density, the greater the MOE and MOR. When a trend curve is plotted including contaminated samples, the correlation loses its coherence. For spruce samples, the correlation, initially including only healthy samples, becomes stronger with the addition of contaminated samples, suggesting that loss of density implies loss of mechanical strength in this case. For similar densities, it is possible to observe that visually altered samples have much lower MOE and MOR values (Figure 4.9).

Table 4.6 MOE and MOR values of pine and spruce and 3 contamination levels

specimen ID	contamination level*	no. of samples	Density (kg/m ³)	Density, standard deviation	MOE mean value (MPa)	MOE, standard deviation (MPa)	MOE, coefficient of variation (%)	MOR (MPa)	MOR, standard deviation (MPa)	MOR, coefficient of variation (%)
Pine										
P2	C1	12	306.3	11.5	3167.3	207.6	6.6	49.9	5.4	10.9
P3	C1	17	367.7	14.8	3732.3	305.4	8.2	60.4	5.5	9.1
P1	C3	13	355.5	23.0	2374.1	572.9	24.1	39.6	7.9	20.1
Spruce										
S11	C1	11	510.2	7.0	4357.9	471.1	10.8	86.0	5.2	6.1
S12	C1	19	481.6	35.8	3669.0	432.7	11.8	72.4	3.1	4.3
S3	C2	7	491.6	19.3	3876.6	833.3	21.5	55.7	32.8	59.0
S7	C2	1	476.4	0	4322.3	-	-	85.4	-	-
S6	C3	8	445.6	16.2	3760.7	673.2	17.9	67.6	14.2	21.1
S8	C3	3	362.7	8.7	1789.0	23.0	1.3	7.4	1.6	21.4
S10	C3	2	358.7	2.0	1314.1	188.3	14.3	6.55	0.9	14.3

*Contamination level: C1 = None or few signs of contamination, C2 = Moderate signs of contamination, C3 = High level of contamination. Italics highlights the low number of specimens.

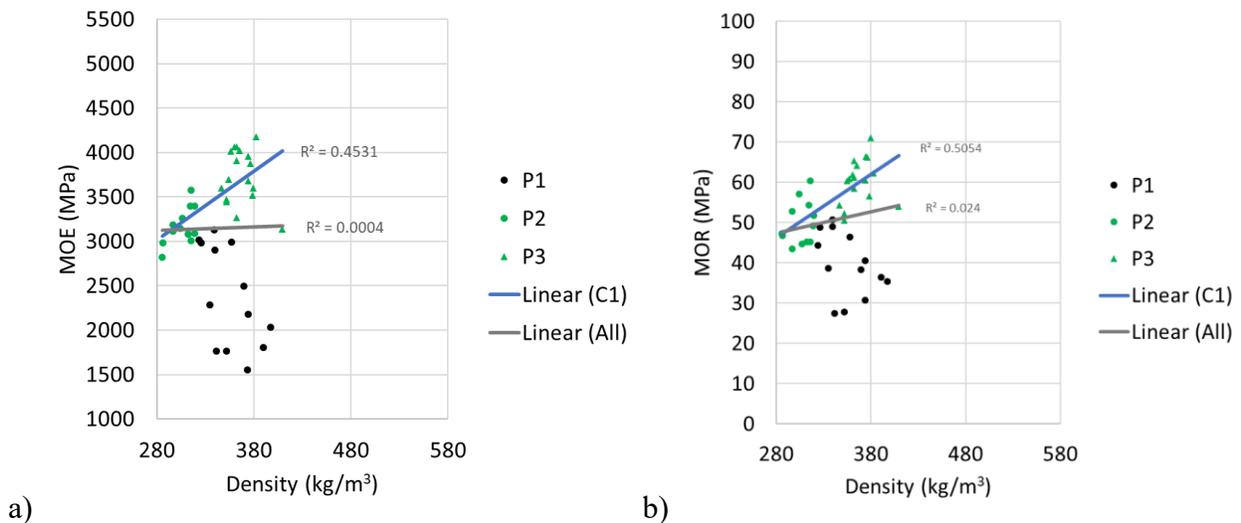


Figure 4.8 a) MOE and b) MOR values for pine samples

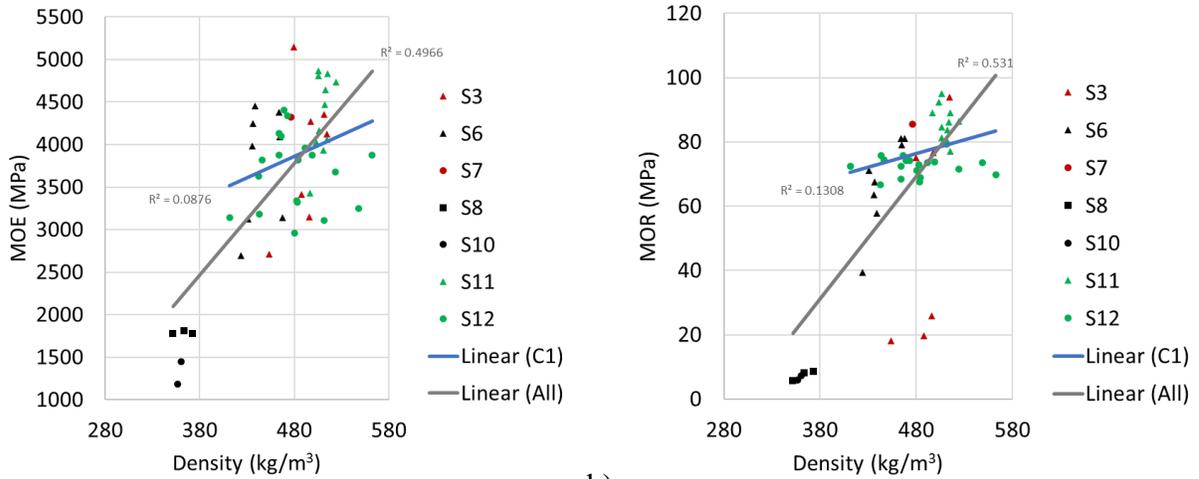


Figure 4.9 a) MOE and b) MOR values for spruce samples

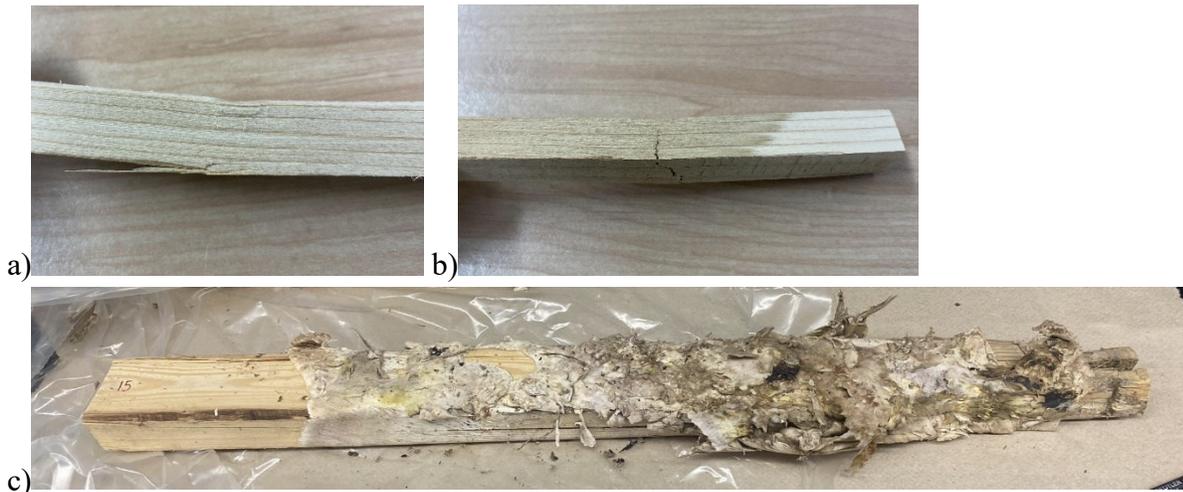


Figure 4.10 a) Spruce sample with no sign of contamination b) Spruce sample with signs of degradation c) Spruce specimen covered by *S. lacrymans*

The two samples shown in Figure 4.10a and Figure 4.10b come from the same piece of wood, covered by *S. lacrymans*, shown in Figure 4.10c. Figure 4.10b shows signs of alteration with its darker brown color. Table 4.7 presents MOE and MOR values measured. For a density 5.5% higher, S3 (Figure 4.10a) has MOE and MOR values respectively 47.3% and 75.8% higher than S3 (Figure 4.10b).

Table 4.7 MOE and MOR values and densities as measured for two S3 samples

Sample ID	Density (kg/m ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
S3 (Fig. 7a)	479.6	5141.3	75.1
S3 (Fig.7b)	453.5	2705.3	18.2

We note that mechanical testing indicates that the absence of mass loss does not necessarily mean the absence of loss of mechanical strength. As there is no known method for estimating loss of mechanical strength from visual inspection of contaminated samples, when rot-affected components play a structural role, it would be preferable to replace them, even if the contamination is minimal [37].

4.5.2 Hygrothermal performance of assemblies with contaminated components

Assessment of contaminated wood hygrothermal properties

To simulate the hygrothermal behavior of wood, material property datasets used in hygrothermal simulation have a completeness and range of measurement that is beyond the characterization performed with our limited number of specimens. Hence, to ensure the robustness of the property dataset applied in the simulations, material property datasets available in Delphin are selected and adjusted according to our findings on sound wood. The properties of sound pine (Ps) come from materials 714 Pine_longitudinal (from Saxony) and 715 Pine radial (from Saxony) and the healthy properties of sound spruce (Ss) come from 711 Spruce longitudinal (from Saxony) and 712 Spruce_radial (from Saxony), as listed in the Delphin database [25]. These materials are chosen because, among the essences with properties in two directions from the same laboratory, they are the ones that most closely resemble density-wise the specimens collected in this study. For Phase 1, these material properties are used as is, except for moisture sorption which is replaced by results obtained experimentally on sound wood. Table 4.8 provides density (ρ in [kg/m³]), water vapor resistance factor (μ in [-]), porosity (ϕ in [m³/m³]), capillary saturation content (w_{cap} in [m³/m³]), effective saturation (w_{sat} in [m³/m³]) and water uptake coefficient (A_{cap} in [kg/(m².s^{0.5})]) for longitudinal and radial directions of healthy pine and spruce.

Given the scarcity of our pine results, we do not attempt to produce a “contaminated pine” dataset,

and we proceed solely to produce a “contaminated spruce” dataset using the results of contaminated samples of spruce reported above to calibrate the retained spruce dataset. To do this, based on the properties characterized in the laboratory, the properties of the materials selected in Delphin are weighted. For example, as the contaminated wood density has a percentage deviation of 15% lower, the 15% deviation is applied to the wood density taken from Delphin to create the contaminated wood to be simulated. Our proposed calibrated hygrothermal properties of spruce contaminated to levels C2 and C3 are listed in Table 4.8.

Table 4.8 Base properties of pine and spruce and calibrated properties of spruce wood at two contamination levels

ID	contamination level*	ρ (kg/m ³)	μ longitudinal	Φ (m ³ /m ³)	W_{cap} (m ³ /m ³)	W_{sat} (m ³ /m ³)	A_{cap} longitudinal (kg/(m ² .s ^{0.5}))	A_{cap} radial (kg/(m ² .s ^{0.5}))
Pine								
Ps	C1	554.3	4.54	0.654	0.63	0.65	0.018	0.016
Spruce								
Ss	C1	393.7	4.57	0.738	0.65	0.73	0.012	0.019
SCon1	C2	378.1	4.86	0.752	0.67	0.83	0.010	0.011
SCon2	C3	341.3	6.95	0.787	0.76	0.86	0.008	0.007

*Contamination level: C1 = None or few signs of contamination, C2 = Moderate signs of contamination, C3 = High level of contamination

Hygrothermal simulation results

The hygrothermal parameters, temperature, relative humidity, moisture content, are evaluated based on an average value over the area of each of the 12 zones.

Phase 1

Phase 1 is carried out to target areas of decay over time and to assess which cities are more prone to decay depending on the scenario. Figure 4.11 shows a comparison of the results obtained for the seven cities, for the four scenarios in zone 8. The results for the other 11 zones can be found in Supplemental Information.

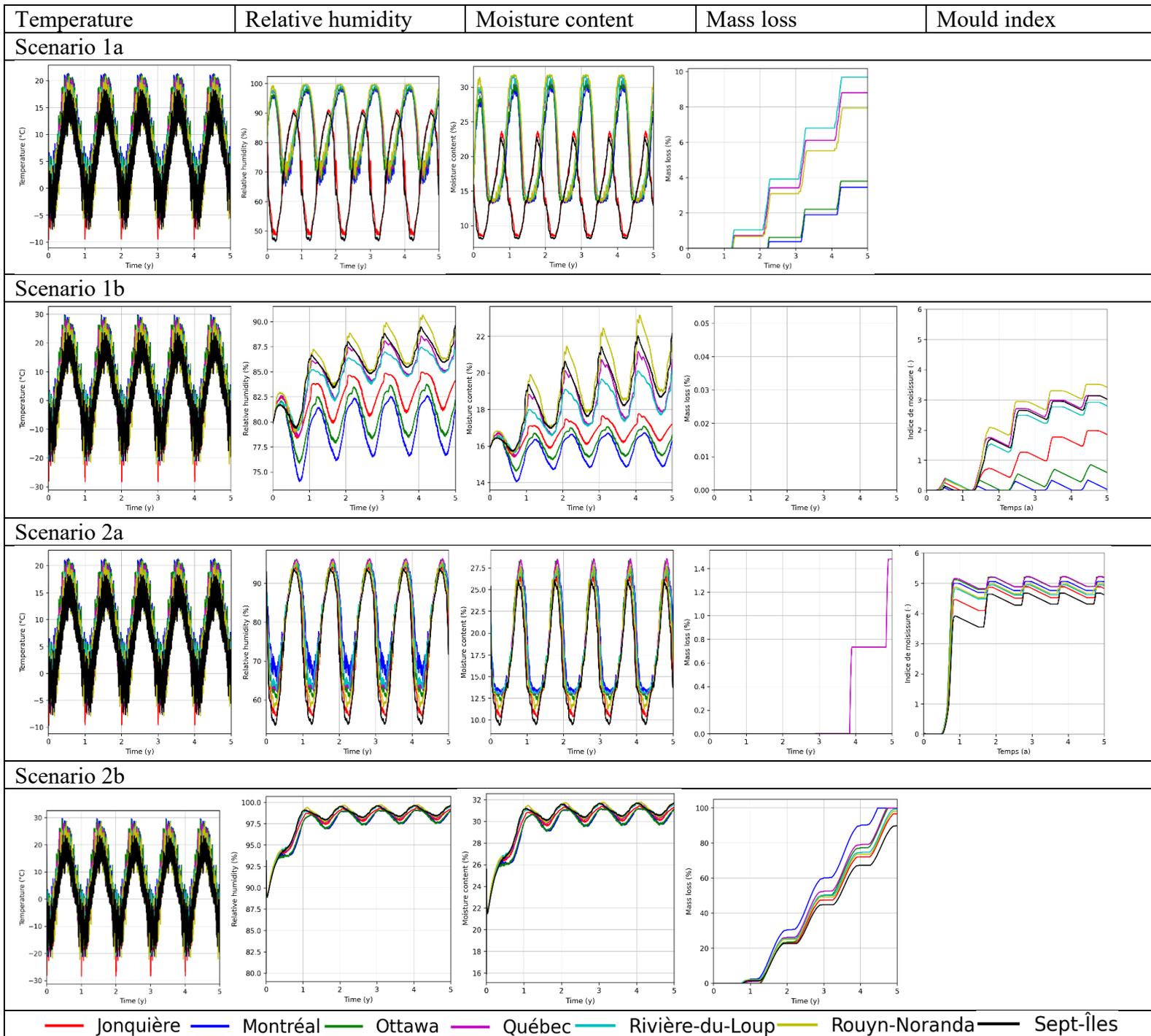


Figure 4.11 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 8 of spruce joist for the 2 scenarios, 2 configurations and 7 cities.

In Scenario 1, maintaining the relative humidity at 80% RH in the crawl space contributes to creating favorable conditions for the degradation of wood components. In Scenario 1a, the interior face of the wood components is the location where biodegradation begins and is at its worst. For

both pine and spruce, the highest mass loss is seen for Rivière-du-Loup. The cities of Jonquière and Sept-Îles show no mass loss. More degradation is recorded for pine than spruce in this scenario. Scenario 1b is free from degradation in the five years simulated as polyurethane foam acts as a barrier to water vapor present in the crawl space, preventing excess moisture from being absorbed by wood components. Since the maximum annual water content continues to increase with each year of simulations, as shown in Figure 4.11, it would not be impossible to observe mass loss in the assembly in the future. Figure 4.12a shows the repartition of mass loss over time for Scenario 1a. Scenario 1b is not illustrated as no mass loss was measured.

In Scenario 2, insulated assemblies have a greater and more widespread mass loss than the same assemblies without insulation. This confirms that insulating a moist wood or a wood component subjected to a moisture source contributes to material degradation by limiting its drying potential and maintaining temperatures favorable to biodegrading agents. For Scenario 2a, the degradation is localized at the water source and remains closer to the exterior side of the wall assembly when noticeable. In Scenario 2b, the greatest mass loss is recorded around the water source and degradation progresses more rapidly in the sill plate than in the joist. According to the simulation results, Jonquière and Sept-Îles appear to be the least susceptible cities to decay for these scenarios. On the contrary, the climates of Québec City, Montréal and Rouyn-Noranda seem more likely to generate favorable conditions to decay in these scenarios. More degradation is recorded for pine than spruce in both cases. Figure 4.12c and Figure 4.12d show the repartition of mass loss in time for Scenario 2a and Scenario 2b.

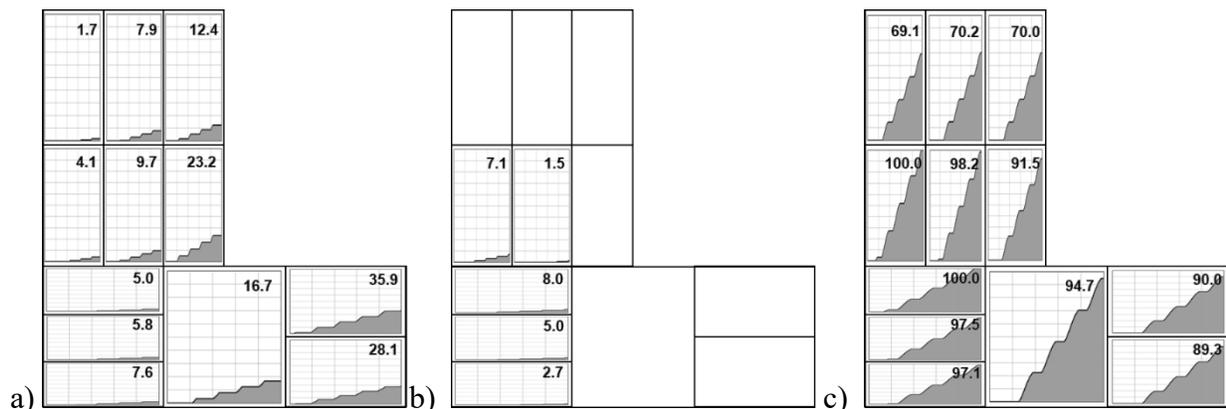


Figure 4.12 Repartition of mass loss for five years for a) Scenario 1a b) Scenario 2a c) Scenario 2b, for spruce assembly under the climate of the cities of Rivière-du-Loup, Québec, and Rouyn-Noranda.

Phase 2

To measure the impact of changing wood properties on the hygrothermal performance of assemblies, simulations are carried out for the cities of Montréal and Sept-Îles for the scenario most susceptible to mass loss (Scenario 2b). The stages of wood property changes are based on average mass losses of 3.96% and 13.3% measured in the laboratory. The impact of the change in properties is observable and differs according to the targeted zone of the assembly. For the city of Sept-Îles, zones 1 to 9 have a higher total mass loss when properties are changed. However, zones 10 to 12 are less degraded once the wood properties are modified. In every zone, mass loss starts at the same time than in the reference scenario. For the city of Montréal, mass loss is generally lower when the wood properties are changed. For zones 1 to 3 and 7 to 9, mass loss also starts later when the wood properties are modified. Since porosity increases with wood degradation, it is possible that degradation has a thermal influence on the assembly in the sense that the drying potential is increased. In effect, a higher porosity could be accompanied with a changed configuration of the pore network in the wood. As Montréal is a warmer city than Sept-Îles, the wood assembly may be able to dry better when the wood properties are changed.

Phase 3

Hygrothermal simulation tools and mass loss calculations consider degradation by a fungus that is considered dead, i.e. that does not contribute to water transport. For the city of Sept-Îles, mass loss with added water transfer is higher for zones 1 to 9 than for Phase 1 and 2. For zones 10 to 12, mass loss for Phase 3 is still a little higher than what is observed for Phase 2 while following the same trend but is lower than what is seen for Phase 1. As for Montréal, mass loss with water transfer follows the same trend as Phase 2 but is a little higher in all zones. While higher than for Phase 2, the values measured are still lower than in Phase 1. The amount of water added would therefore not be sufficient to overcome the drying potential increase resulting from wood degradation in Montréal, as discussed in the previous section. Figure 4.13 shows the evolution of mass loss and MC for zone 8.

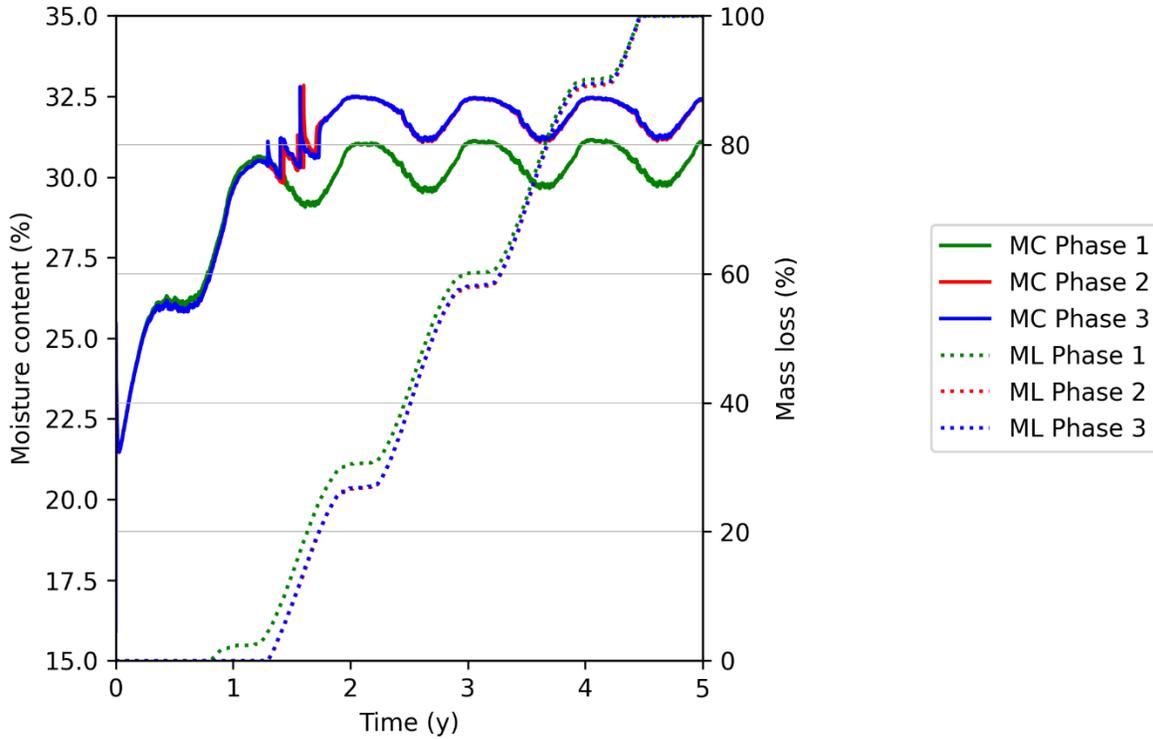


Figure 4.13 Comparison of mass loss and MC for three simulation phases for spruce assembly for Scenario 2b in Montréal and with changing material properties to reflect biodegradation at 4% and 13.3% mass loss.

Model sensitivity

To look at the impact of considering wood properties orthotropically, the same scenario is simulated, on one hand, with the anisotropic material transport model to consider different wood properties in radial and longitudinal dimensions (2D) and, on the other hand, using isotropic material properties. Figure 4.14 shows a comparative example of the impact of this change for Scenario 2b for the city of Montréal in zone 6 of the sill plate.

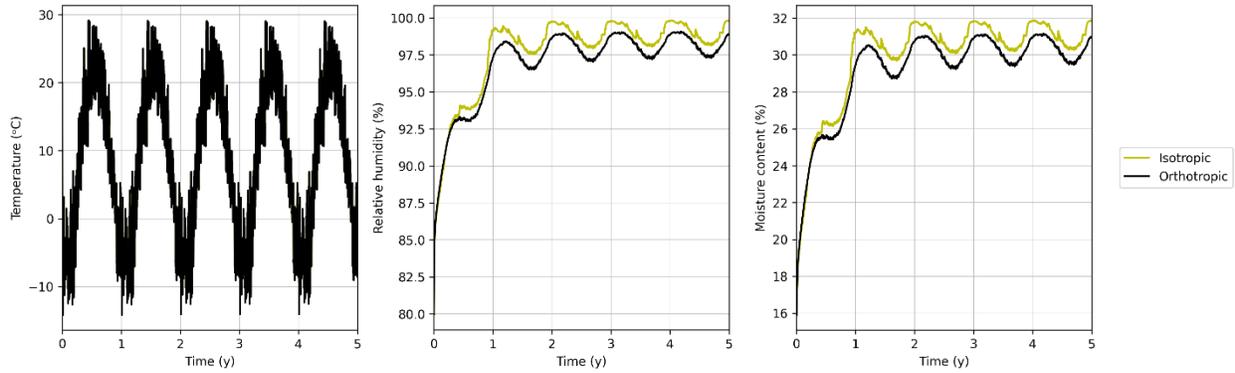


Figure 4.14 Comparison of the influence of isotropic and orthotropic wood properties on temperature, relative humidity, and moisture content in a section of sill plate, for scenario 2b for Montréal.

Figure 4.14 shows that simulation with isotropic or orthotropic material properties has no impact on the temperature in the wood. However, it can be observed that relative humidity and moisture content are generally higher and more variable for the simulation with one-dimensional wood properties than for that where two dimensions are included. These variations validate the importance of characterizing anisotropic materials with anisotropic material properties to obtain more realistic results.

4.6 Discussion and conclusion

The growing number of cases of *S. lacrymans* in Québec has led the provincial government to look for ways of obtaining more scientific knowledge specific to the province environmental conditions and built environment. A better understanding of the impact of wood degradation by *S. lacrymans* can undoubtedly lead to better prevention or control of the damage caused by the fungus. To arrive at the methodology presented in this paper, we collected samples of sound wood and wood contaminated by *S. lacrymans* across the province to study their physical and mechanical properties. This approach was chosen to observe actual cases of contamination and to discuss with owners the history leading up to their situations. These discussions helped us to understand that *S. lacrymans* contamination problems are not necessarily linked to negligence on the part of homeowners, contrary to what is dictated in insurance policies.

We performed characterisation of the hygric and mechanical properties of the collected samples. The key results of this study showed that, regardless of the wood species tested, the water vapor resistance factor of samples degraded by *S. lacrymans* was higher for contaminated samples than

healthy samples. In future work, it would be pertinent to measure the water vapor resistance factor in, at least, three different relative humidities to have a better portrait of this parameter. The study showed that A_{cap} values were higher for healthy samples and that w_{cap} values seemed to increase along with contamination levels. For spruce samples, w_{sat} values were increasing with the contamination level, but the contrary was true for pine samples. Finally, no conclusion could be drawn from pine sorption isotherms, but sorption isotherms were lower for spruce degraded samples than for sound samples.

Regarding the mechanical characterization, results showed that the absence of mass loss does not mean no loss of mechanical strength. However, certain trends have been observed. For spruce samples, both MOE and MOR values seemed to be increasing with density. As for pine MOR values seemed to increase with density, but no correlation was found between MOE values and density.

This project characterized wood damaged at different levels of contamination. Several factors influenced the results: the natural variability of the wood, the number of samples characterized and the unavailability of pre-contamination properties to really compare the change in properties. Also to bear in mind, although the collection of contaminated wood specimens in the field enabled us to better observe and understand the environmental conditions in which the fungus develops, it is likely that some of the specimens collected were contaminated by more than one fungus. In order to limit the effect of these factors and to limit the likelihood of multiple contamination, wood samples characterized in a healthy state could subsequently be contaminated with *S. lacrymans* in controlled conditions and characterized at different levels of contamination. This contamination method could enable more accurate mass loss measurements and the corresponding physical and mechanical tests to be carried out. Further, to simulate the behavior of *S. lacrymans* more realistically, it could be interesting to investigate the conditions and responses of the fungus to water transport in living and dead states. Such a study could provide a better understanding of water transport by the fungus, and thus contribute to estimating the state of contamination and its level of degradation over time. In this sense, the growth rate of *S. lacrymans* could be integrated into the models.

In terms of the assessment of the hygrothermal performance of wood-based wall assemblies contaminated by *S. lacrymans*, the project simulations were separated in three phases, including a phase regrouping all 7 city climates with two sub scenarios, a high RH crawl space and a continuous

water leak in the wall assembly. Simulations have shown which climates in Québec offer the most favorable conditions for decay, namely Montréal, Québec City, Rivière-du-Loup, Rouyn-Noranda, and which are less favorable to decay, i.e. Jonquière and Sept-Îles. The project showed that a dry insulated wood assembly was without surprise better protected from biodegrading agents, and that if wet wood components were insulated, the risk of degradation was accentuated. Uninsulated wall assemblies were influenced by both indoor and outdoor climatic conditions. Phase 2 of the simulations showed that degraded wood properties could enhance drying potential in warmer climates but accentuate water retention in colder climates. Finally, Phase 3 showed that the addition of a water source into components, as a surrogate of hyphae-borne moisture transfer in the assemblies, slightly accentuated mass loss compared to Phase 2.

Should this work go on, additional avenues could be explored. First, the simulations were carried out with wood properties in two directions, longitudinal and radial. With an adequate amount of data characterized in the laboratory, it would be interesting to integrate wood properties in the tangential direction into the simulations. In this sense, the simulations were carried out using a two-dimensional computational domain. Performing the simulations in a three-dimensional model could allow us to consider structural elements such as studs and floor joists, which have been neglected in the wall assembly featured in the project. Two insulation scenarios were considered for the project, one with a crawl space fully insulated with polyurethane and one with an uninsulated crawl space. In the future, it may be appropriate to simulate a partially insulated crawl space, for example by placing a layer of insulation only on the foundation wall. Different crawl space ventilation scenarios could also be explored. Furthermore, it would be interesting to run simulations based on optimistic and pessimistic climate projections to see the effect of climate change on the degradation of wood assemblies affected by *S. lacrymans*.

This paper documented the characterization of wood properties in sound and contaminated specimens and succeeded in simulating the spread of biodegradation in wood-frame buildings and, more specifically, investigated this spread considering the impact of *S. lacrymans* contamination of wood components on the hygrothermal performance of wood-framed wall assemblies. The work presented has the particularity of being two-pronged, combining experimental work and simulations to provide a better understanding of the deterioration caused by the growth of *S. lacrymans* in wood-framed building assemblies in Québec, under different environmental conditions.

CHAPITRE 5

Conclusion

Les agents de biodégradation du bois seront toujours présents dans l'écosystème immobilier. Une meilleure compréhension de ces agents peut sans doute permettre de mieux prévenir ou mieux contrôler les dommages qu'ils causent. Le besoin soulevé pour ce projet de recherche était de pallier au manque de connaissances scientifiques sur l'influence de la dégradation par le champignon mэрule pleureuse sur le comportement hygrothermique des structures de bois au Québec.

L'objectif général du projet était donc de développer une connaissance du comportement et de la propagation de la mэрule pleureuse dans les structures de bois afin d'évaluer les dommages causés par le champignon dans différentes conditions environnementales. Pour atteindre cet objectif global, trois objectifs spécifiques ont été établis.

Le premier objectif spécifique consistait à développer un modèle de simulation de transfert de chaleur et d'humidité dans du bois affecté par la mэрule pleureuse. Ce premier point a été atteint par le développement d'une méthodologie et un modèle supporté par le logiciel Delphin.

Le second objectif visait à valider le modèle développé avec des mesures et des données recueillies sur des échantillons de bois contaminés en laboratoire et des données prises in situ. Pour ce faire, des échantillons ont été prélevés sur le terrain puis caractérisés en laboratoire afin d'en obtenir des valeurs de masse volumique, de porosité, de facteur de résistance à la vapeur d'eau, de saturation capillaire, de saturation effective et d'action capillaire. Les échantillons ont également fait l'objet d'essais mécaniques dans le but d'obtenir des données comparatives quant à leur résistance en flexion. La caractérisation en laboratoire a permis de constater que le bois dégradé par la mэрule pleureuse avait une résistance plus grande au passage de la vapeur d'eau, que les valeurs d'absorption capillaire étaient plus élevées dans les échantillons de bois sains et que la saturation capillaire était plus grande pour les échantillons contaminés. Les valeurs de saturation effective mesurées étaient plus élevées pour le bois d'épinette contaminé, mais plus basses pour le bois de pin. En ce qui a trait aux propriétés mécaniques, bien qu'une absence de perte de masse ne soit

équivalente à une absence de changement dans les propriétés mécaniques, quelques tendances ont pu être observées. En effet, pour les échantillons de pin sains, plus la masse volumique était élevée, plus le MOE et le MOR étaient importants. L'ajout d'une courbe de tendance en incluant les échantillons contaminés a cependant fait perdre à la corrélation sa cohérence. Pour les échantillons d'épinette, la corrélation, qui ne comprenait initialement que des échantillons sains, est devenue plus forte avec l'ajout d'échantillons contaminés, ce qui suggère que la perte de masse volumique implique une perte de résistance mécanique dans ce cas. Pour des masses volumiques similaires, il a été possible d'observer que les échantillons visuellement altérés avaient des valeurs de MOE et de MOR beaucoup plus faibles.

Le dernier objectif spécifique consistait à utiliser le modèle de simulation pour effectuer des analyses paramétriques sur des assemblages de murs prédéterminés dans des conditions environnementales spécifiques pour bâtir une connaissance accrue de la propagation et des dommages causés par la mûre pleureuse sur le territoire québécois. Pour compléter cet objectif, plusieurs assemblages de mur, datant de la période de construction résidentielle de 1945 à 1975, ont été étudiés. L'assemblage sélectionné a été simulé en deux variantes, soit sans aucune isolation dans le vide sanitaire (a), puis avec un vide sanitaire isolé complètement au polyuréthane (b). Ensuite, pour pouvoir connaître les risques de dégradation à travers le territoire québécois, des fichiers météorologiques d'années de référence pour sept villes à travers la province ont été construits par une doctorante de l'Université Concordia Anahita Bigtashi, sur la base des besoins de cette étude. Les simulations ont été réalisées en trois phases. Dans chacune de ces phases, les conditions intérieures et extérieures sont restées inchangées. Seules les propriétés du bois et les conditions de vide sanitaire ont été variées. Deux scénarios d'environnement considérés problématiques ont été retenus pour les simulations : un scénario où l'humidité relative du vide sanitaire est maintenue à 80% (Scénario 1) et un autre où une infiltration d'eau en continue est simulée dans l'assemblage de bois (Scénario 2). Pour la première phase (Phase 1), les propriétés du bois ont uniquement été simulées comme étant saines, puis les assemblages ont été soumis aux conditions climatiques de chacune des sept villes ciblées. La deuxième phase (Phase 2) a impliqué de modifier les propriétés du bois en cours de simulation pour observer l'impact de ce changement de propriétés sur l'humidité et la température du bois. La dernière phase (Phase 3) était similaire à la Phase 2, mais une certaine quantité d'eau a été ajoutée au fil du

changement de propriétés pour simuler la capacité de la mérule pleureuse à déplacer sa source d'eau. Les phases 2 et 3 ont été simulées pour les villes de Montréal et Sept-Îles pour le Scénario 2b. Les extrants des simulations ont permis d'observer que, parmi les sept villes ciblées dans la province, Montréal, Québec, Rivière-du-Loup et Rouyn-Noranda étaient les plus susceptibles à subir les effets de la dégradation par la pourriture. À l'inverse, Jonquière et Sept-Îles semblaient avoir les conditions les moins favorables à la pourriture. Le Scénario 1b a permis de confirmer que l'isolation d'un assemblage de bois sec était bénéfique pour sa protection contre les agents biodégradant. Sans surprise, le Scénario 2b a montré, au contraire, que d'isoler un bois préalablement humide accentuait les risques de dégradation. Les assemblages non-isolés ont été beaucoup plus influencés par les conditions environnementales que ceux qui étaient isolés. Le changement des propriétés du bois en cours de simulation a mis en lumière que la dégradation du bois pouvait contribuer à accentuer le potentiel de séchage du bois dans les climats plus chauds, mais favoriser la rétention d'eau dans les climats plus froids. L'ajout d'une composante de transfert d'eau dans la Phase 3 a accentué la perte de masse par rapport aux résultats obtenus en Phase 2.

5.1 Contributions du projet de recherche

Ce projet de recherche contribue à augmenter le bagage de connaissances scientifiques actuel au sujet de la propagation et des dommages causés par la mérule pleureuse au Québec. Comme les logiciels de simulation hygrothermique présents sur le marché ne permettent pas de prendre en compte l'influence de la dégradation du bois par la pourriture en cours de simulation, une nouvelle approche a été expérimentée afin de modifier les propriétés du bois en fonction du niveau de dégradation à même les simulations. Ce changement de propriétés a été fait à deux moments clés de chacune des simulations. Avec davantage de données caractérisées en laboratoire pour le bois dégradé, il pourrait sans doute être possible d'automatiser ce changement de propriétés dans le logiciel de simulation. Les données supplémentaires pourraient permettre de changer les propriétés du bois de façon graduelle. Néanmoins, il a été possible de constater que le changement dans les propriétés du bois a un impact sur les transferts d'humidité et de chaleur dans l'enveloppe des bâtiments. Nous notons que le projet a également permis de produire des fichiers météorologiques de

référence pour sept villes au Québec qui pourront être intégrés au logiciel Delphin pour un usage futur.

5.2 Limites et recommandations

Dans l'optique de continuer le projet, plusieurs avenues pourraient être explorées. D'abord, les simulations ont été réalisées avec les propriétés du bois dans deux directions, soit les directions longitudinale et radiale. Avec une quantité adéquate de données caractérisées en laboratoire, il serait intéressant d'intégrer les propriétés du bois en direction tangentielle aux simulations. En ce sens, les simulations ont été réalisées dans un modèle à deux dimensions. Procéder aux simulations dans un modèle à trois dimensions pourrait permettre de tenir compte d'éléments structuraux comme les montants et les solives de plancher, qui ont été négligés dans l'assemblage de mur qui figure dans le projet. Deux scénarios d'isolation ont été considérés pour le projet, soit un scénario avec un vide sanitaire entièrement isolé avec du polyuréthane et un scénario sans isolation dans le vide sanitaire. Dans le futur, il pourrait être pertinent de simuler un vide sanitaire partiellement isolé, en plaçant par exemple une couche d'isolant uniquement sur le mur de fondation. Différents scénarios de ventilation et de conditionnement du vide sanitaire pourraient également être explorés.

En ce qui a trait à la caractérisation du bois, plusieurs causes d'erreur ont pu biaiser les résultats. Bien que la collecte d'échantillons de bois contaminé sur le terrain ait permis de mieux observer et comprendre les conditions environnementales de développement du champignon, il est probable que quelques échantillons récoltés aient été contaminés par plus d'un champignon. Pour limiter les probabilités de contamination multiple, une culture du champignon pourrait être développée en laboratoire. Des échantillons de mêmes dimensions, provenant de billes de bois connues pourraient être exposés à la mэрule pleureuse dans des conditions environnementales données pour différents intervalles de temps afin de comparer avec plus de certitude les niveaux de dégradation du bois. Ce type de contamination pourrait permettre d'effectuer avec davantage de précision des mesures de perte de masse et des essais physiques et mécaniques en conséquent.

Pour simuler de manière plus réaliste le comportement de la mэрule pleureuse, il pourrait être intéressant d'investiguer les conditions et la réponse du champignon au transport de l'eau par mycélium et par cordon à l'état vivant et à l'état mort. Cette étude pourrait permettre de

mieux comprendre le transport de l'eau effectué par le champignon et ainsi contribuer à estimer l'état d'une contamination et son niveau de dégradation dans le temps. En ce sens, le taux de croissance de la mэрule pleureuse pourrait ętre intęgrę aux modęles.

Dans le futur, pour une caractęrisation plus pręcise des isothermes de sorption, un appareil qui mesure la sorption de vapeur d'eau (DVS) [77] aurait avantage ętre utilisę. Cet appareil emploie une technique gravimętrique de sorption qui mesure la vitesse et la quantitę de vapeur qui peut ętre absorbęe par un matęriau. Un tel appareil pourrait permettre un meilleur contręle sur les mesures autrement prises manuellement et sur leur incertitude. La dęsorption pourrait ęgalement ętre mesuręe par cet instrument.

Finalement, les essais męcaniques ont ętę ręalisęs avec un rapport longueur/largeur de 10 pour tirer le maximum d'ęchantillons des morceaux de bois contaminęs alors que ce rapport aurait dę ętre de 14 pour respecter la norme ASTM D143-22 [42]. Une ętude de sensibilitę sur cet aspect pourrait ętre effectuęe.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Environnement et Changement climatique Canada, « Changements dans la température », canada.ca. Consulté le: 25 avril 2022. [En ligne]. Disponible à: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/essentiels/tendances-projections/changements-temperature.html>
- [2] Québec (Province), Comité interministériel sur la mэрule pleureuse, et Société d'habitation du Québec, « État de la situation sur la mэрule pleureuse au Québec », Gouvernement du Québec, Société d'habitation du Québec, 2018. Consulté le: 5 avril 2022. [En ligne]. Disponible à: <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/3512982>
- [3] ACQC, « La mэрule pleureuse : un « cancer du bâtiment » encore méconnu ! », ACQC. Consulté le: 28 mars 2022. [En ligne]. Disponible à: <https://acqc.ca/fr/la-m%C3%A9rule-pleureuse>
- [4] O. Schmidt, « Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control », *Mycol. Prog.*, vol. 6, n° 4, p. 261-279, oct. 2007.
- [5] D. Maltais, J. Cherblanc, et A. Malenfant, « La contamination de sa demeure par la mэрule pleureuse : vécu des propriétaires occupants et conséquences sur leur vie personnelle, conjugale, familiale, sociale et professionnelle et leur conception de leur chez-soi », UQAC, Département des sciences humaines et sociales, Chicoutimi, nov. 2021. [En ligne]. Disponible à: https://www.merulepleureusequebec.ca/uploads/1/1/8/9/118981778/rapportshqfinal_nov2021.pdf
- [6] A. Déjardin, F. Laurans, D. Arnaud, C. Breton, G. Pilate, et J.-C. Leplé, « Wood formation in Angiosperms », *C. R. Biol.*, vol. 333, n° 4, p. 325-334, avr. 2010.
- [7] Cloutier, Alain et Achim, Alexis, « Principales caractéristiques anatomiques du bois des gymnospermes et des angiospermes », dans *La dendroécologie : Principes, méthodes et applications*, Presses de l'Université Laval, 2018, p. 7-22.
- [8] J. F. Siau, *Wood : Influence of moisture on physical properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University: Department of Wood Science and Forest Products, 1995.
- [9] T. Stevanovic et D. Perrin, *Chimie du bois*, Première édition. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009.
- [10] I. S. Goldstein, « Wood Formation and Properties : Chemical Properties of Wood », dans *Encyclopedia of Forest Sciences*, J. Burley, Éd., Oxford: Elsevier, 2004, p. 1835-1839. [En ligne]. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0121451607000429>
- [11] M. Chen, C. Zhang, A. Shomali, B. Coasne, J. Carmeliet, et D. Derome, « Wood–Moisture Relationships Studied with Molecular Simulations: Methodological Guidelines », *Forests*, vol. 10, n° 8, p. 1-27, 2019.
- [12] T. A. Tabet, « Cellulose Microfibril Angle in Wood and Its Dynamic Mechanical Significance », dans *Cellulose*, F. A. Aziz, Éd., Rijeka: IntechOpen, 2013, p. 1-31.
- [13] P. DesRochers, V. Huppé, J.-M. Leclerc, et P. Chevalier, « La mэрule pleureuse, *Serpula lacrymans* : revue de la situation historique et des interventions possibles », *Phytoprotection*, vol. 97, n° 1, p. 44-53, 2017.
- [14] H. Kauserud *et al.*, « Asian origin and rapid global spread of the destructive dry rot fungus

- Serpula lacrymans », *Mol. Ecol.*, vol. 16, n° 16, p. 3350-3360, 2007.
- [15] J. VanderGoot, « Considering Dry Rot: The Co-evolution of Buildings and Serpula lacrymans », *J. Archit. Educ.*, vol. 71, n° 2, p. 225-231, juill. 2017.
- [16] O. Schmidt, *Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use*, 1^{re} éd. Hamburg, Germany: Springer Berlin, 2006.
- [17] G. A. Low, J. W. Palfreyman, N. A. White, et D. C. R. Sinclair, « Development of Model Systems for Investigations of the Dry Rot Fungus Serpula lacrymans (Schumach. ex Fr.) Gray: Use for Analysis of the Environmental Sensitivity of the Organism », *Gruyter*, vol. 53, n° 2, p. 129-136, 1999.
- [18] W. Thompson, D. Eamus, et D. H. Jennings, « Water flux through mycelium of Serpula lacrimans », *Trans. Br. Mycol. Soc.*, vol. 84, n° 4, p. 601-608, janv. 1985.
- [19] J. Ruiz-Herrera, *Fungal Cell Wall: Structure, Synthesis, and Assembly*, Second. CRC Press, 2012.
- [20] M. R. Islam, G. Tudryn, R. Bucinell, L. Schadler, et R. C. Picu, « Morphology and mechanics of fungal mycelium », *Sci. Rep.*, vol. 7, n° 1, p. 1-13070, déc. 2017.
- [21] TheAlphaWolf, *English: Hyphae as seen under an overturned log*. Consulté le: 29 septembre 2022. [En ligne]. Disponible à: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hyphae.JPG>
- [22] C.-E. Hagentoft *et al.*, « Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases », *J. Therm. Envel. Build. Sci.*, vol. 27, n° 4, p. 327-352, avr. 2004.
- [23] B. Hejazi, N. Rodrigues Marques Sakiyama, J. Frick, et H. Garrecht, « Hygrothermal Simulations Comparative Study: Assessment of Different Materials Using WUFI and DELPHIN Software », dans *Building Simulation 2019*, Rome, Italy: Building Simulation, 2019, p. 4674-4681. Consulté le: 3 août 2022. [En ligne]. Disponible à: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_211033.pdf
- [24] Fraunhofer IBP, « WUFI », wufi.de. Consulté le: 5 septembre 2022. [En ligne]. Disponible à: <https://wufi.de/en/>
- [25] Bauklimatik-Dresden, « DELPHIN », [Delphin](http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php). Consulté le: 6 avril 2022. [En ligne]. Disponible à: <https://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php>
- [26] COMSOL, « COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs », COMSOL. Consulté le: 24 avril 2022. [En ligne]. Disponible à: <https://www.comsol.com/>
- [27] National Research Council Canada, « 1-D hygIRC: a simulation tool for modeling heat, air and moisture movement in exterior walls - NRC Publications Archive », canada.ca. Consulté le: 24 avril 2022. [En ligne]. Disponible à: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=eba189e5-bd50-4854-9111-e41687e14dec>
- [28] D. M. Burch et J. Chi, « MOIST A PC program for predicting heat and moisture transfer in building envelopes ». [En ligne]. Disponible à: <http://users.encs.concordia.ca/~raojw/crd/essay/essay000180.html>
- [29] J. Delgado, N. Ramos, E. Barreira, et V. Freitas, « A critical review of hygrothermal models used in porous building materials », *J. Porous Media*, vol. 13, p. 221-234, janv. 2010.
- [30] M. Defo, M. Lacasse, et A. Laouadi, « A comparison of hygrothermal simulation results derived from four simulation tools », *J. Build. Phys.*, vol. 45, n° 4, p. 432-456, janv. 2022.
- [31] H. Janssen, « Simulation efficiency and accuracy of different moisture transfer potentials », *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 7, n° 5, p. 379-389, sept. 2014.
- [32] R. A. Zabel et J. J. Morrell, « Chapter Ten - Changes in the strength and physical properties

- of wood caused by decay fungi », dans *Wood Microbiology (Second Edition)*, R. A. Zabel et J. J. Morrell, Éd., San Diego: Academic Press, 2020, p. 271-291. [En ligne]. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128194652000103>
- [33] O. Karppanen, M. Venäläinen, A. M. Harju, et T. Laakso, « The effect of brown-rot decay on water adsorption and chemical composition of Scots pine heartwood », *Ann. For. Sci.*, vol. 65, n° 6, p. 610-610, janv. 2008.
- [34] K. Sedlbauer, « Prediction of mould growth by hygrothermal calculation », *J. Therm. Envel. Build. Sci.*, vol. 25, n° 4, p. 321-336, avr. 2002.
- [35] H. Viitanen *et al.*, « Towards modelling of decay risk of wooden materials », *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 68, n° 3, p. 303-313, août 2010.
- [36] C. Duchaine, M. Veillette, et J. Degois, « Projet d'amélioration des connaissances sur la mērule pleureuse (*Serpula lacrymans*) au Québec », Centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec (CRIUCPQ), Université Laval, 2022.
- [37] Forest Products Laboratory et United States Department of Agriculture, « Wood Handbook, Wood as an Engineering Material », Madison, WI, General Technical Report FPL-GTR-190, avr. 2010. Consulté le: 19 mai 2022. [En ligne]. Disponible à: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf
- [38] W. W. Wilcox, « Review of Literature on the Effects of Early Stages of Decay on Wood Strength », *Wood Fiber Sci.*, vol. 9, n° 4, p. 252-257, 1978.
- [39] C. M. Sexton, M. E. Corden, et J. J. Morrell, « Assessing Fungal Decay of Wood By Small-scale Toughness Tests », *Wood Fiber Sci.*, vol. 25, n° 4, p. 375-383, 1993.
- [40] J. Liese et J. Stamer, « Vergleichende Versuche über die Zerstörungsintensität einiger wichtiger holzerstörender Pilze und die hierdurch verursachte Festigkeitsminderung des Holzes », *Angew Bot*, vol. 16, n° 4, p. 363-372, 1934.
- [41] F. F. P. Kollmann et W. A. Côté, *Principles of wood science and technology*, 1^{re} éd. New York, NY: Springer Berlin, 1968.
- [42] D07 Committee, « Test Methods for Small Clear Specimens of Timber », ASTM International, juill. 2021. Consulté le: 5 avril 2022. [En ligne]. Disponible à: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D143-14>
- [43] G. Alfredsen, E. Larnøy, et H. Militz, « Dynamic MOE testing of wood: the influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration », *Wood Res.*, vol. 51, n° 1, p. 11-20, 2006.
- [44] « MTS », MTS. Consulté le: 19 septembre 2023. [En ligne]. Disponible à: <https://www.mts.com/fr/products/materials/static-materials-test-systems/www.mts.com>
- [45] D07 Committee, « Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes », ASTM International. Consulté le: 6 décembre 2023. [En ligne]. Disponible à: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D198-22>
- [46] « Le bois et l'humidité », Cecobois. Consulté le: 28 août 2023. [En ligne]. Disponible à: <https://cecobois.com/details-de-conception-durabilite-et-protection/le-bois-et-lhumidite/>
- [47] C.-M. Chiu, C.-H. Lin, et T.-H. Yang, « Application of Nondestructive Methods to Evaluate Mechanical Properties of 32-Year-Old Taiwan Incense Cedar (*Calocedrus formosana*) Wood », *BioResources*, vol. 8, n° 1, p. 688-700, déc. 2012.
- [48] D. W. Haines, J.-M. Leban, et C. Herbé, « Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods », *Wood Sci. Technol.*, vol. 30, p. 253-263, août 1996.

- [49] C. Aggarwal, M. Defo, T. Moore, M. A. Lacasse, S. Sahyoun, et H. Ge, « Validation of Three Methods of Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Simulations », dans *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020)*, DBMC, sept. 2020, p. 8. Consulté le: 30 août 2022. [En ligne]. Disponible à: https://www.scipedia.com/public/Aggarwal_et_al_2020a
- [50] World Meteorological Organization (WMO), « WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals », WMO, Geneva, 2017.
- [51] R. Djebbar, D. van Reenen, et M. K. Kumaran, « Environmental Boundary Conditions for Long-term Hygrothermal Calculations », dans *Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII*, 2001, p. 1-13.
- [52] A. Teasdale-St-Hilaire et D. Derome, « State-of-the-art review of simulated rain infiltration and environmental loading for large-scale building envelope testing », dans *ASHRAE Transactions*, ASHRAE, 2005, p. 389-401. [En ligne]. Disponible à: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-29144496568&partnerID=40&md5=80c3aa0a0bf81d73fa59661e2cf214a5>
- [53] S. Cornick, R. Djebbar, et W. Alan Dalglish, « Selecting moisture reference years using a Moisture Index approach », *Build. Environ.*, vol. 38, n° 12, p. 1367-1379, déc. 2003.
- [54] X. Zhou, D. Derome, et J. Carmeliet, « Robust moisture reference year methodology for hygrothermal simulations », *Build. Environ.*, vol. 110, p. 23-35, déc. 2016.
- [55] T. Kalamees et J. Vinha, « Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations », *J. Therm. Envel. Build. Sci.*, vol. 27, n° 3, p. 199-220, 2004.
- [56] A. Bigtashi, A. Papakyriakou, et B. Lee, « Defining generation parameters with an adaptable data-driven approach to construct typical meteorological year weather files », *Energy Build.*, vol. 303, p. 1-17, janv. 2024.
- [57] ASHRAE Standing Standard Project Committee 160, « Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings », ASHRAE, Standard ANSI/ASHRAE Standard 160-2021, 2021.
- [58] L. Vanhoutteghem, M. Morelli, et L. S. Sørensen, « Can crawl space temperature and moisture conditions be calculated with a whole-building hygrothermal simulation tool? », dans *11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017*, Trondheim, Norway: Nordic Symposium on Building Physics, oct. 2017, p. 688-693. [En ligne]. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217349184>
- [59] A. Laukkarinen et J. Vinha, « Temperature and relative humidity measurements and data analysis of five crawl spaces », dans *11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway*, oct. 2017, p. 711-716. [En ligne]. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217349238>
- [60] Ressources naturelles Canada, « Le Service canadien des forêts ». Consulté le: 25 mars 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/forets-et-foresterie/le-service-canadien-forets>
- [61] Mérule Québec, « Mérule Québec | Statistiques ». Consulté le: 25 mars 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.merulequebec.ca>
- [62] S. Maurice, L. Coroller, S. Debaets, V. Vasseur, G. Le Floch, et G. Barbier, « Modelling the effect of temperature, water activity and pH on the growth of *Serpula lacrymans*: Predicting risk factors for infestation by *S. lacrymans* », *J. Appl. Microbiol.*, vol. 111, n° 6, p. 1436-1446, déc. 2011.

- [63] S. S. Chauhan et H. C. Nagaveni, « Moisture adsorption behaviour of decayed rubber wood », *J. Inst. Wood Sci.*, vol. 19A, n° 1, p. 1-6, oct. 2009.
- [64] A. N. Papadopoulos, « Sorption of acetylated pine wood decayed by brown rot, white rot and soft rot: different fungi—different behaviours », *Wood Sci. Technol.*, vol. 46, n° 5, p. 919-926, sept. 2012.
- [65] K. H. Lee, S. G. Wi, A. P. Singh, et Y. S. Kim, « Micromorphological characteristics of decayed wood and laccase produced by the brown-rot fungus *Coniophora puteana* », *J. Wood Sci.*, vol. 50, n° 3, p. 281-284, juin 2004.
- [66] MÉRULE Québec, « MÉRULE Québec | Accueil ». Consulté le: 22 mars 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.merulequebec.ca>
- [67] M. Zauer, A. Pfriem, et A. Wagenführ, « Toward improved understanding of the cell-wall density and porosity of wood determined by gas pycnometry », *Wood Sci. Technol.*, vol. 47, n° 6, p. 1197-1211, nov. 2013.
- [68] « Index of /cmc/climate/Engineer_Climate/CWEEDS_FMCEG/CWEEDS_FMCEG_v_2020/CWEEDS-FMCEG_by_par_prov.CSV ». Consulté le: 15 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/climate/Engineer_Climate/CWEEDS_FMCEG/CWEEDS_FMCEG_v_2020/CWEEDS-FMCEG_by_par_prov.CSV/
- [69] I. J. Hall, R. R. Prairie, H. E. Anderson, et E. C. Boes, « Generation of typical meteorological years for 26 some stations », *ASHRAE Trans*, vol. 85, p. 507-517, janv. 1979.
- [70] W. Marion et K. Urban, « User's Manual for TMY2s (Typical Meteorological Years) - Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base », NREL/TP-463-7668, 87130, ON: DE95004064, juin 1995. Consulté le: 3 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.osti.gov/servlets/purl/87130/>
- [71] A. F. Verrall, « Poria Incrassata Rot: Prevention and Control in Buildings », United States Department of Agriculture, Economic Research Service, 171606, 1968.
- [72] E. E. Thybring, « Water relations in untreated and modified wood under brown-rot and white-rot decay », *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 118, p. 134-142, mars 2017.
- [73] E. B. Cowling, *Comparative Biochemistry of the Decay of Sweetgum Sapwood by White-Rot and Brown-Rot Fungi*. Washington, DC, USA: US Department of Agriculture, 1961.
- [74] C. Brischke, S. Stricker, L. Meyer-Veltrup, et L. Emmerich, « Changes in sorption and electrical properties of wood caused by fungal decay », *Holzforschung*, vol. 73, n° 5, p. 445-455, mai 2019.
- [75] F. Schwarze, « Forest Pathology: Heart Rot and Wood Decay », *Encycl. For. Sci.*, vol. 4, p. 808-816, déc. 2004.
- [76] D. S. Flournoy, T. K. Kirk, et T. L. Highley, « Wood Decay by Brown-Rot Fungi: Changes in Pore Structure and Cell Wall Volume », *Holzforschung*, vol. 45, n° 5, p. 383-388, janv. 1991.
- [77] « Dynamic Vapor Sorption », Surface Measurement Systems. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://surfacemeasurementsystems.com/solutions/dynamic-vapor-sorption/>

Annexe A

Les figures suivantes présentent les variations de température, d'humidité relative, de teneur en eau, de perte de masse et d'indice de moisissure pour les 7 villes visées par le projet sur 5 ans de simulations.

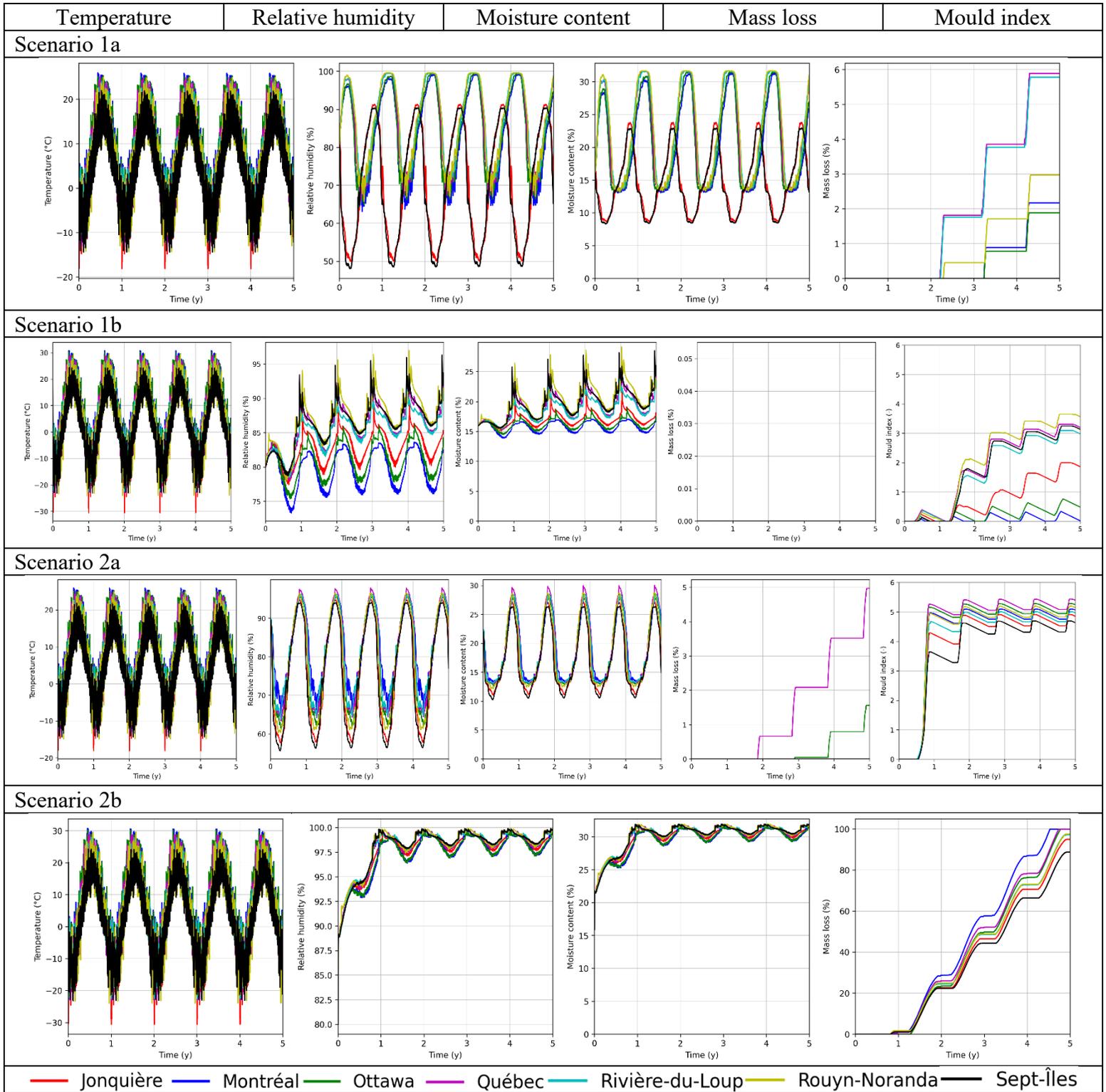


Figure A.1 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 1 (Spruce)

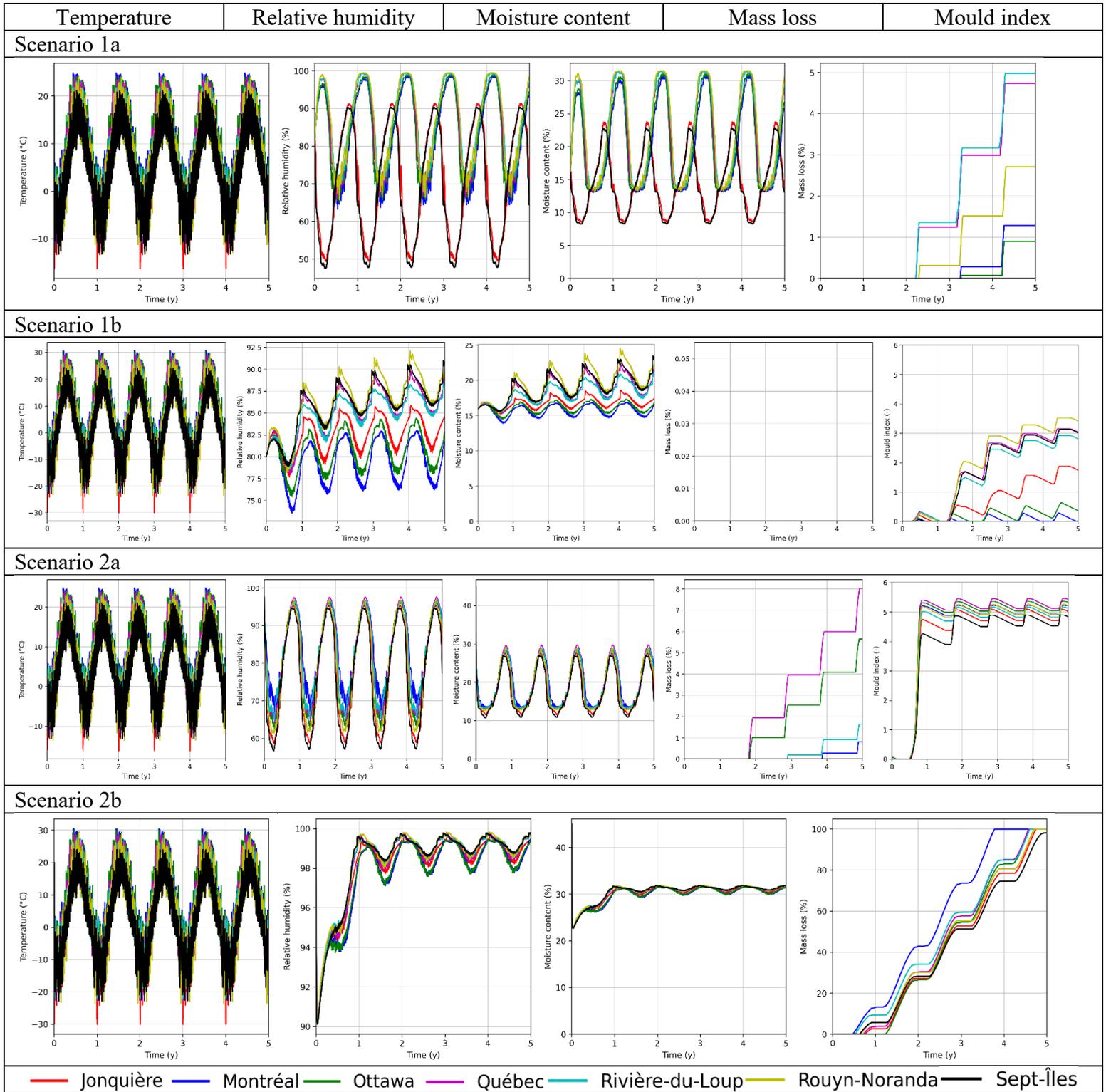


Figure A.2 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 2 (Spruce)

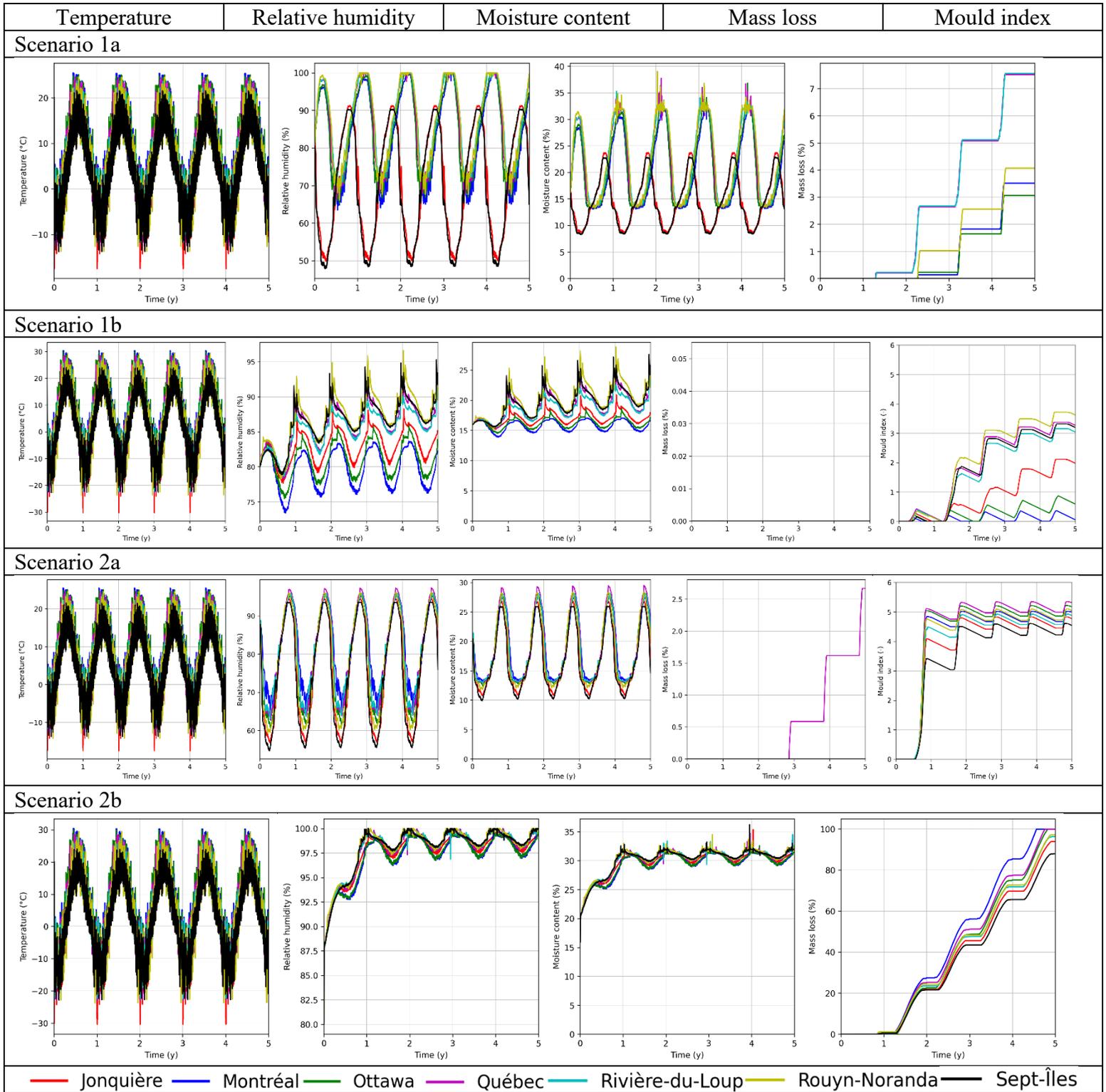
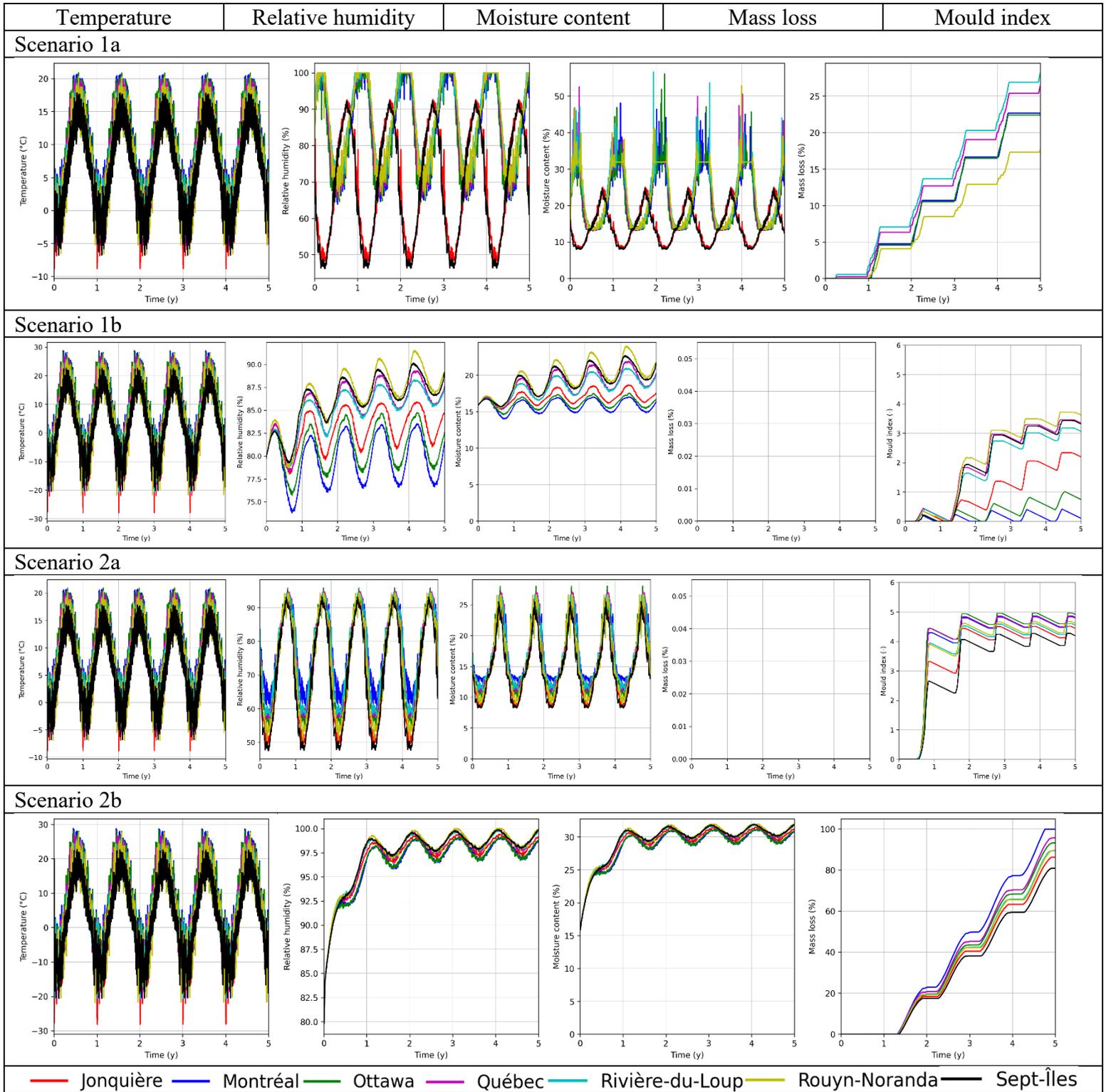


Figure A.3 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 3 (Spruce)



— Jonquière — Montréal — Ottawa — Québec — Rivière-du-Loup — Rouyn-Noranda — Sept-Îles

Figure A.4 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 4 (Spruce)

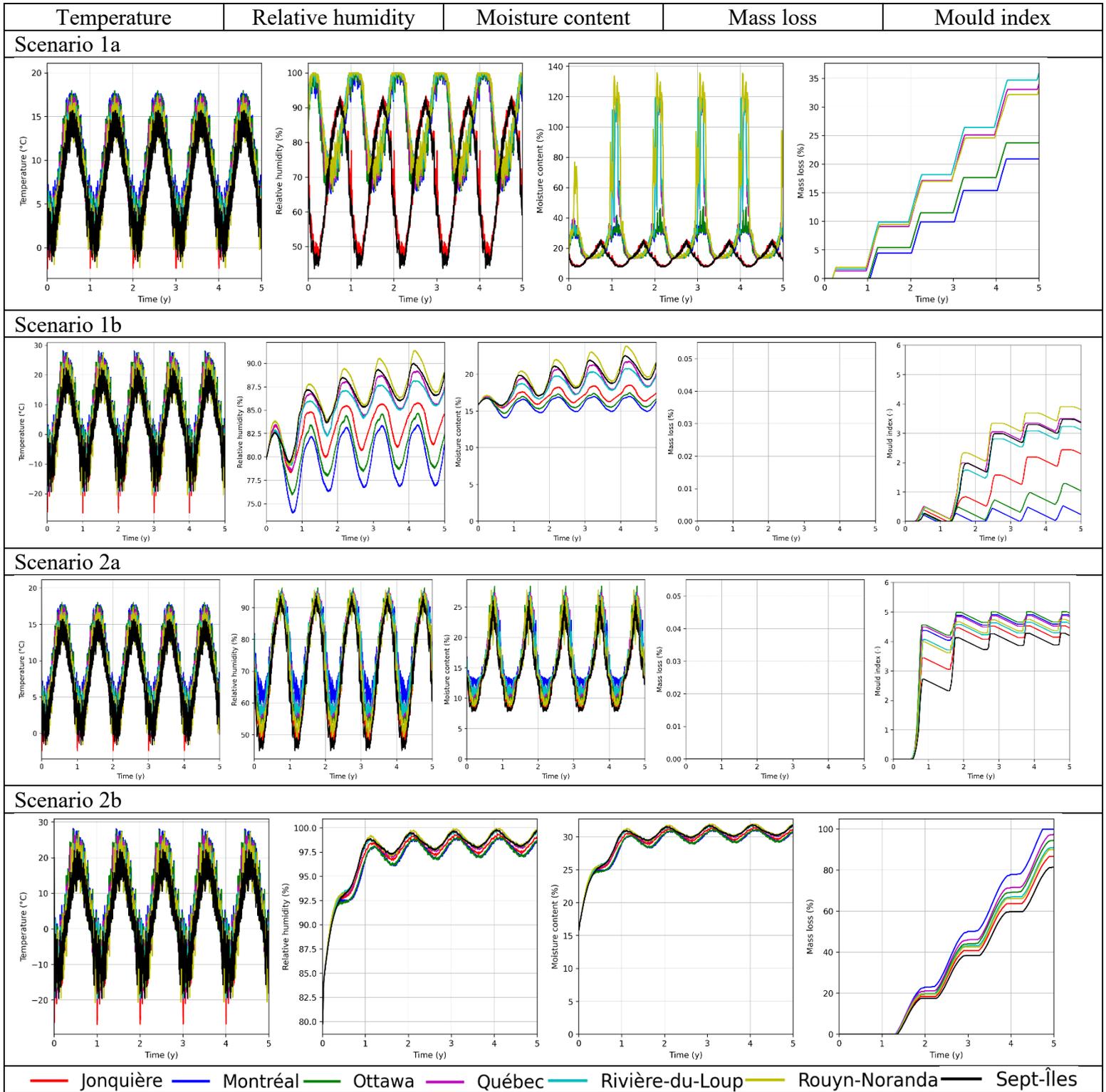


Figure A.5 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 5 (Spruce)

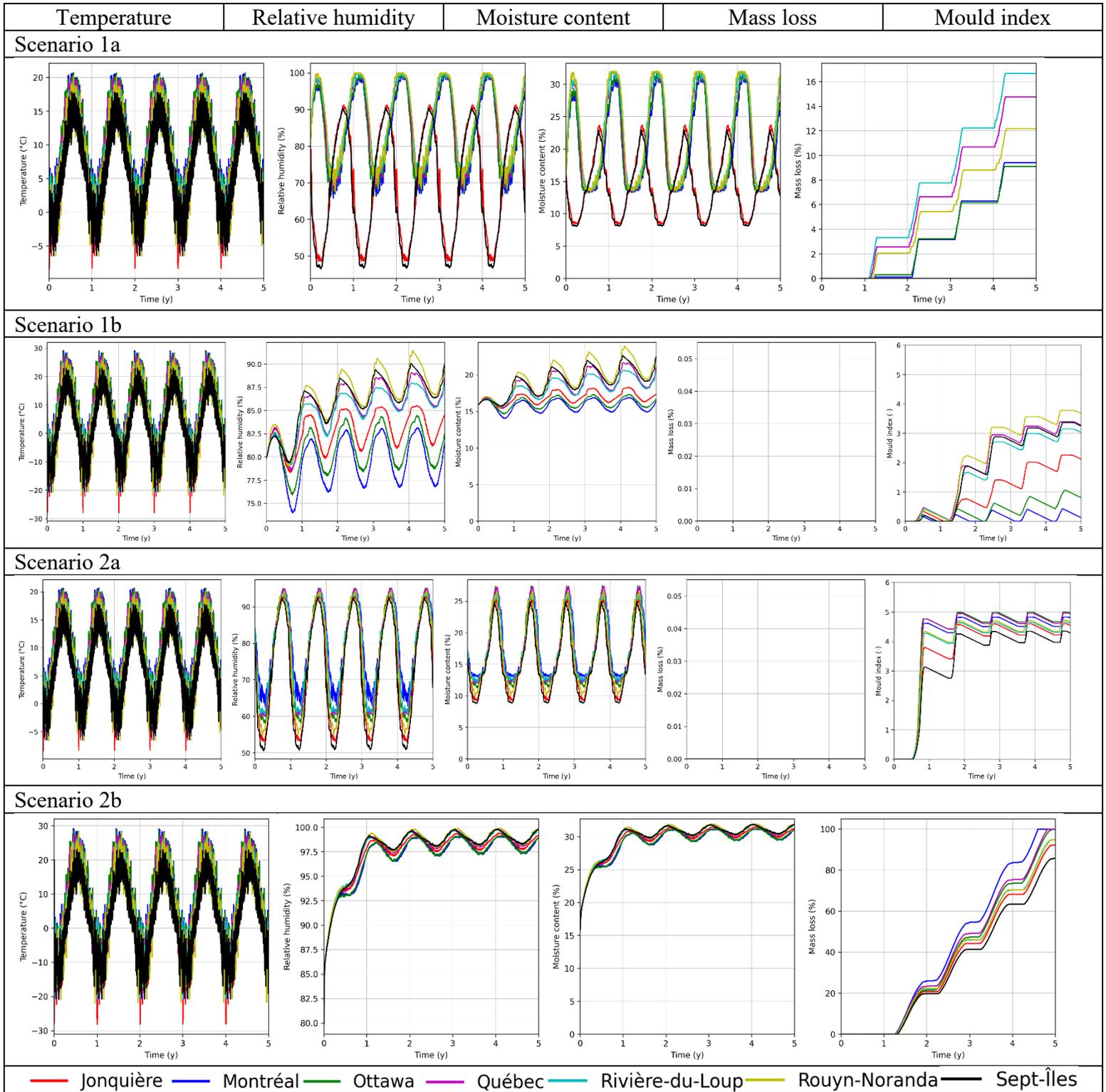
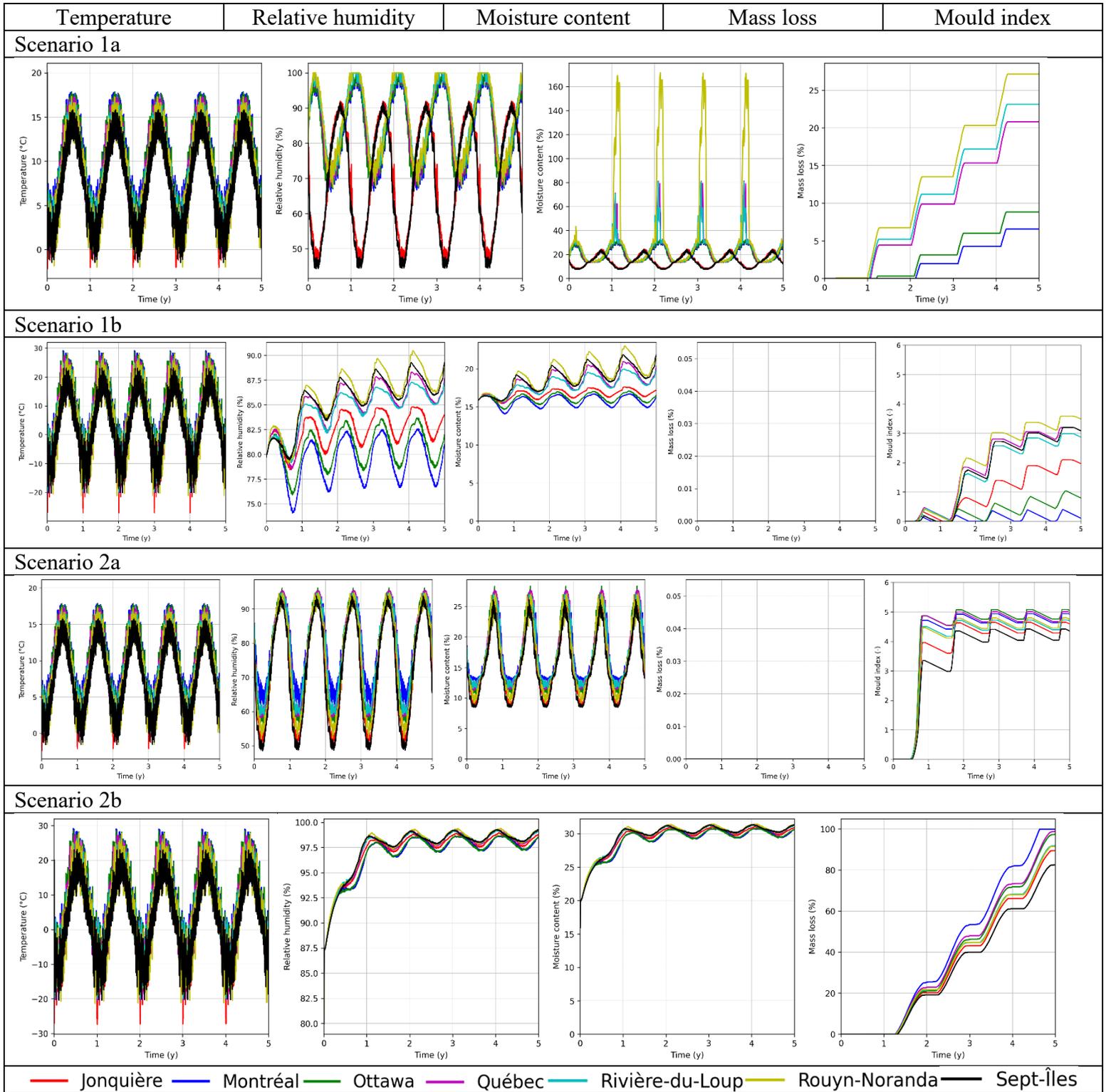
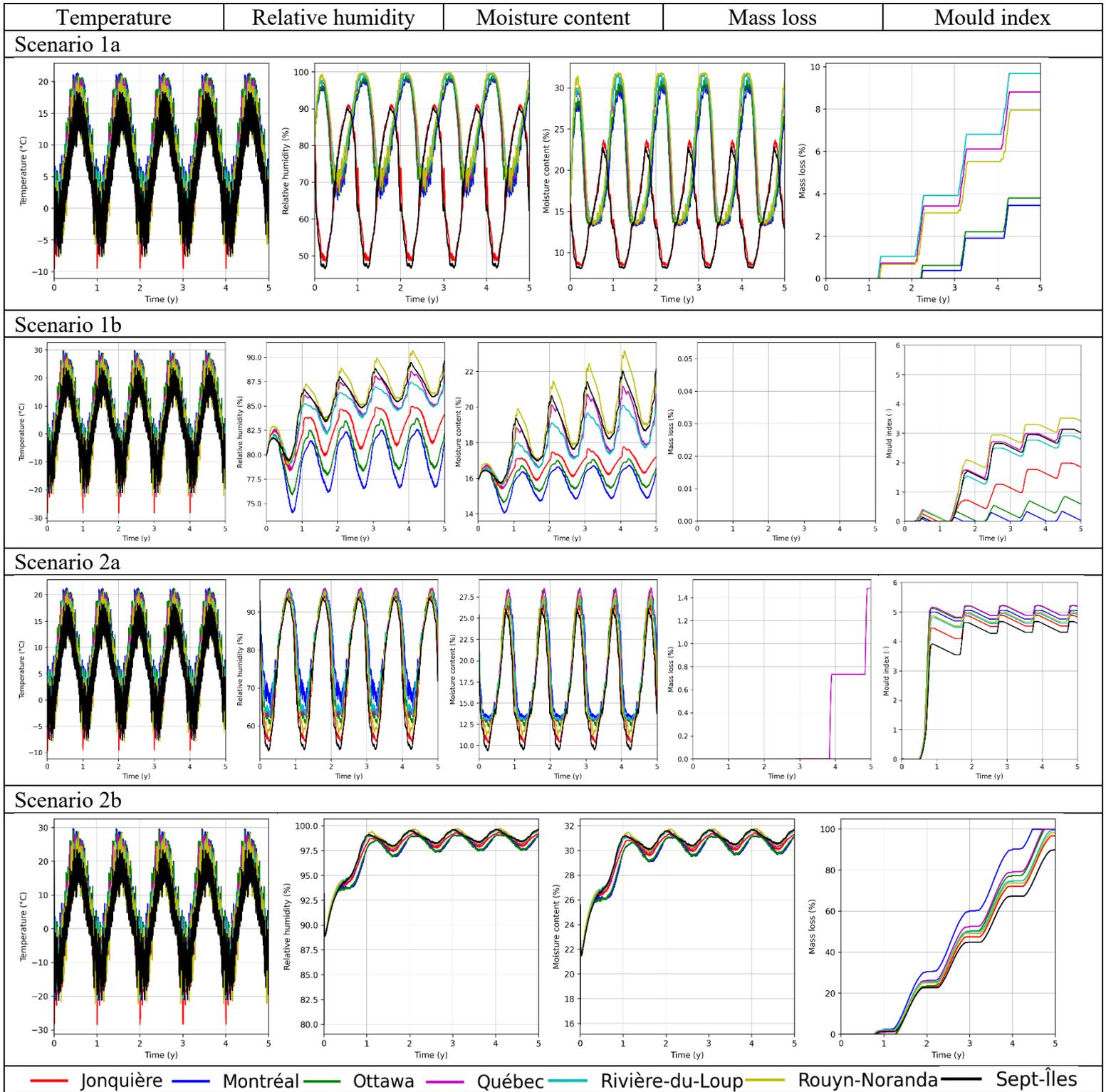


Figure A.6 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 6 (Spruce)



— Jonquière — Montréal — Ottawa — Québec — Rivière-du-Loup — Rouyn-Noranda — Sept-Îles

Figure A.7 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 7 (Spruce)



— Jonquière — Montréal — Ottawa — Québec — Rivière-du-Loup — Rouyn-Noranda — Sept-Îles

Figure A.8 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 8 (Spruce)

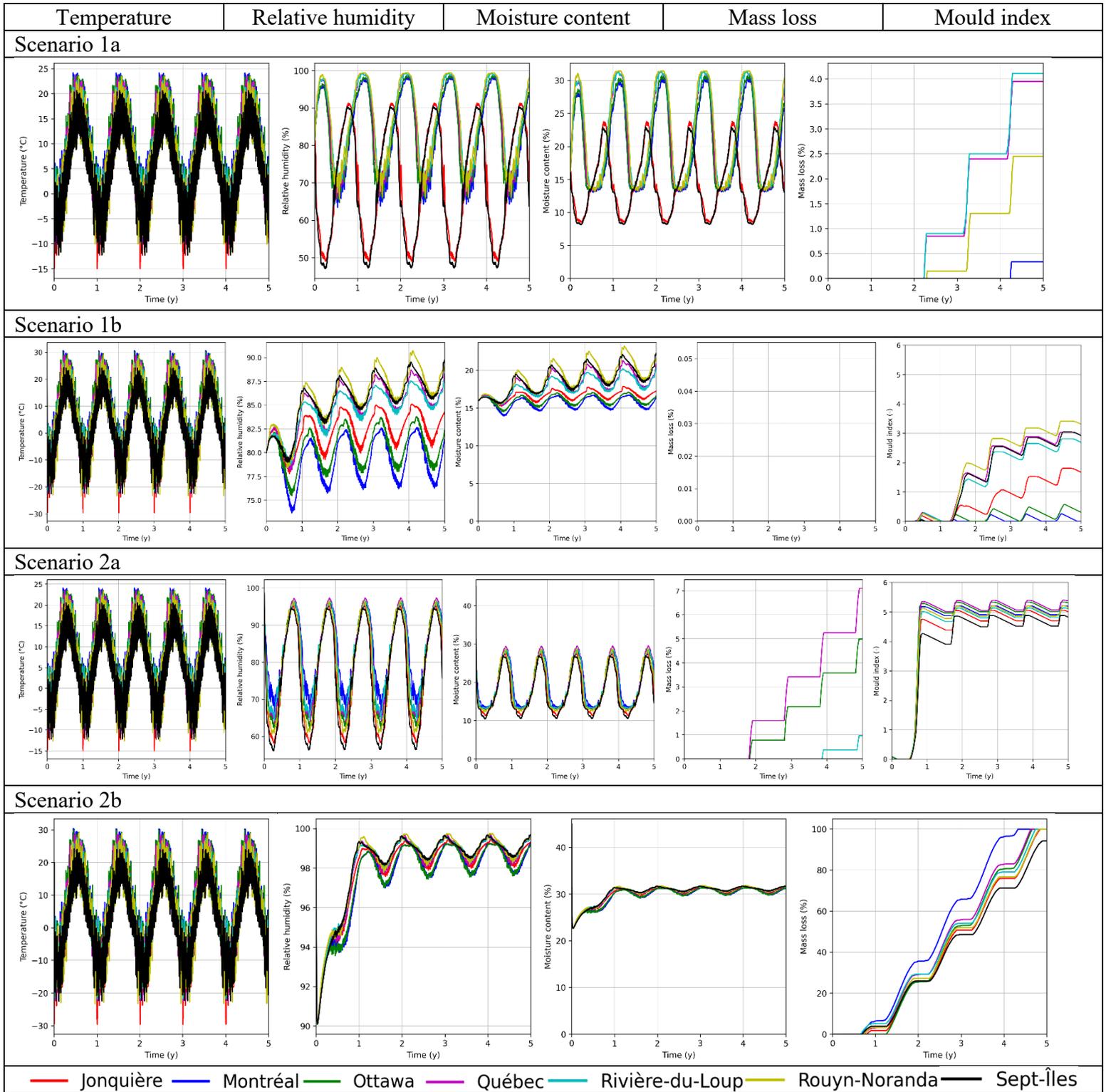


Figure A.9 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 9 (Spruce)

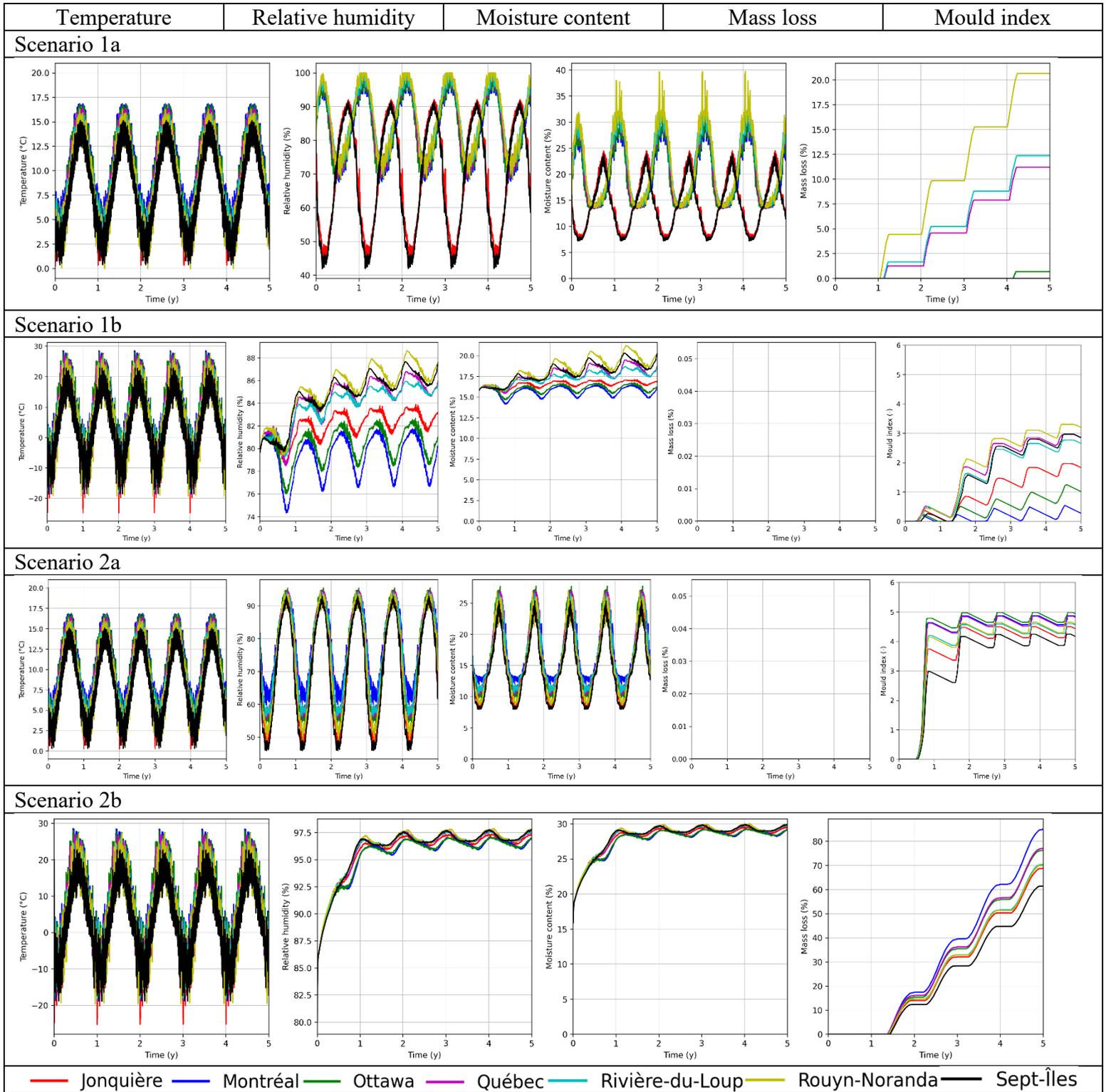
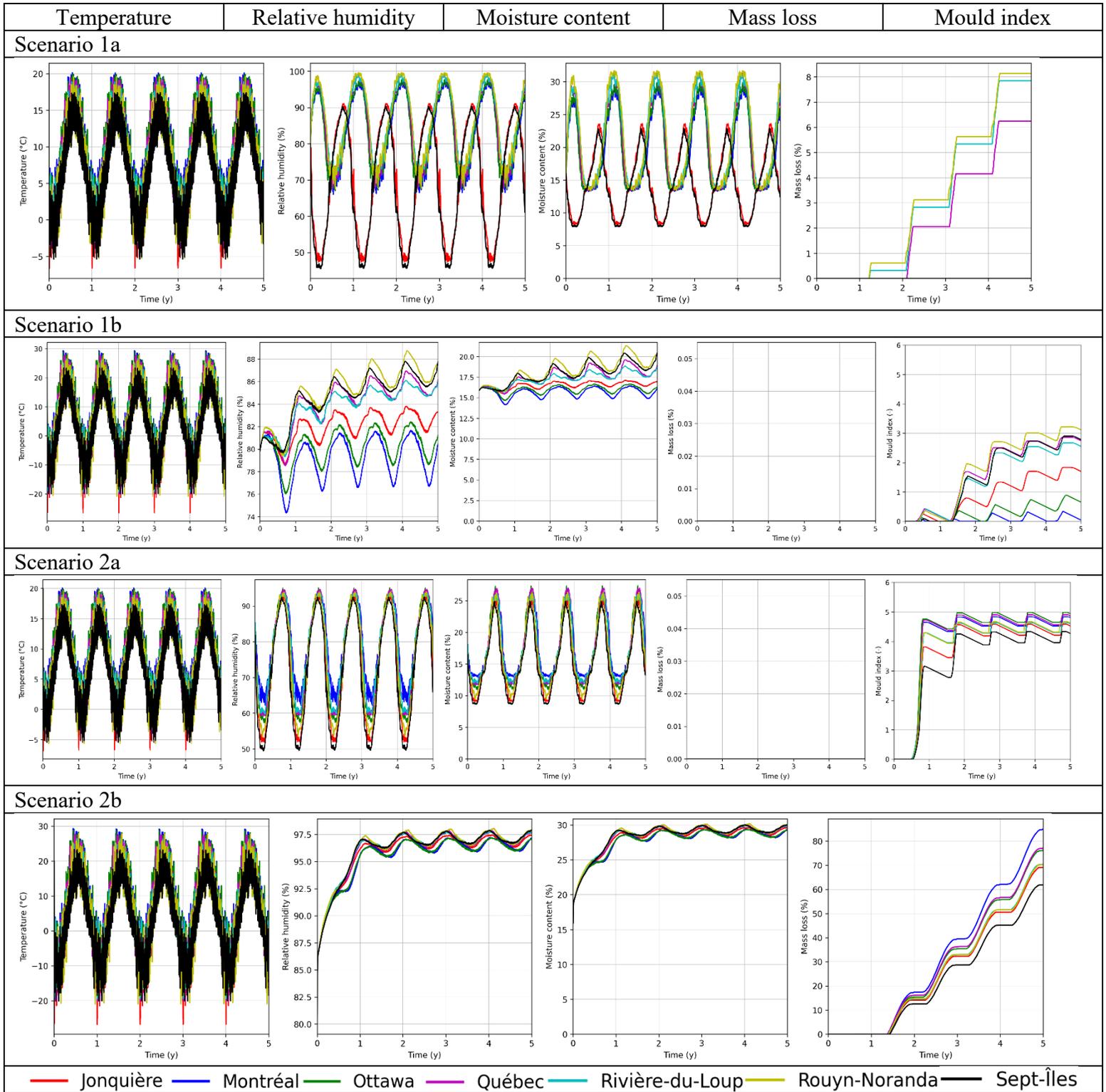


Figure A.10 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 10 (Spruce)



— Jonquière — Montréal — Ottawa — Québec — Rivière-du-Loup — Rouyn-Noranda — Sept-Îles

Figure A.11 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 11 (Spruce)

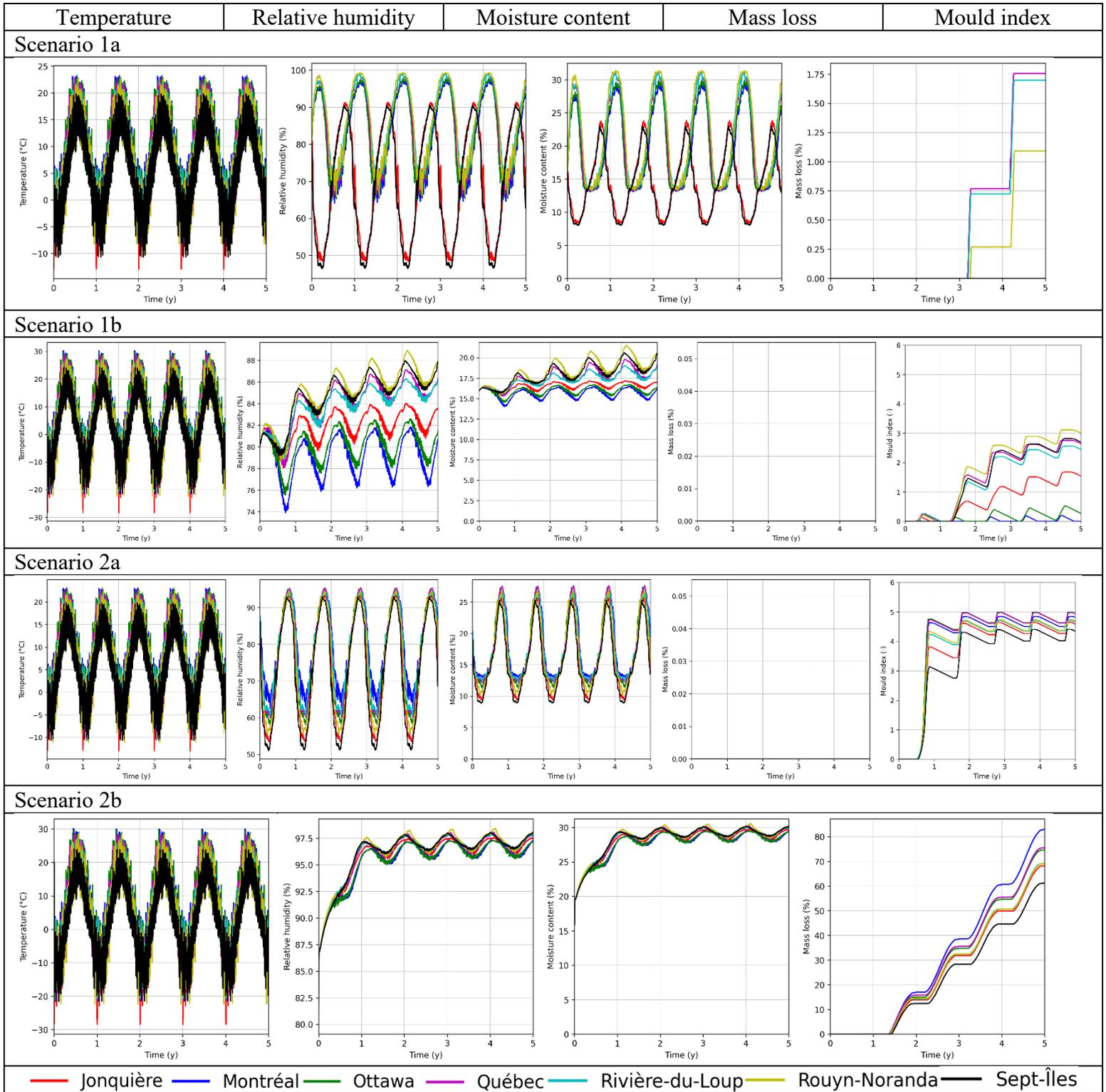


Figure A.12 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 12 (Spruce)

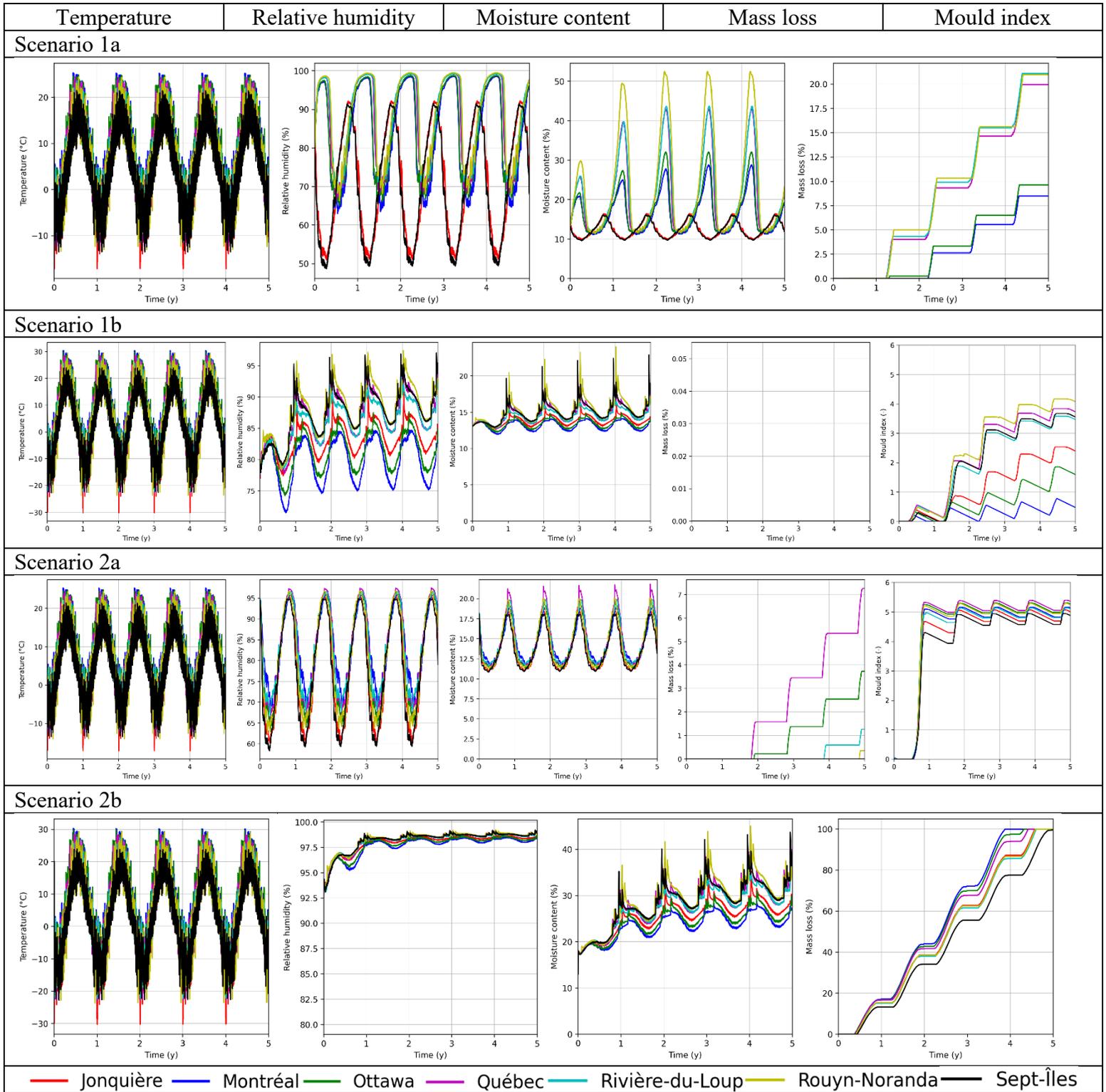


Figure A.13 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 1 (Pine)

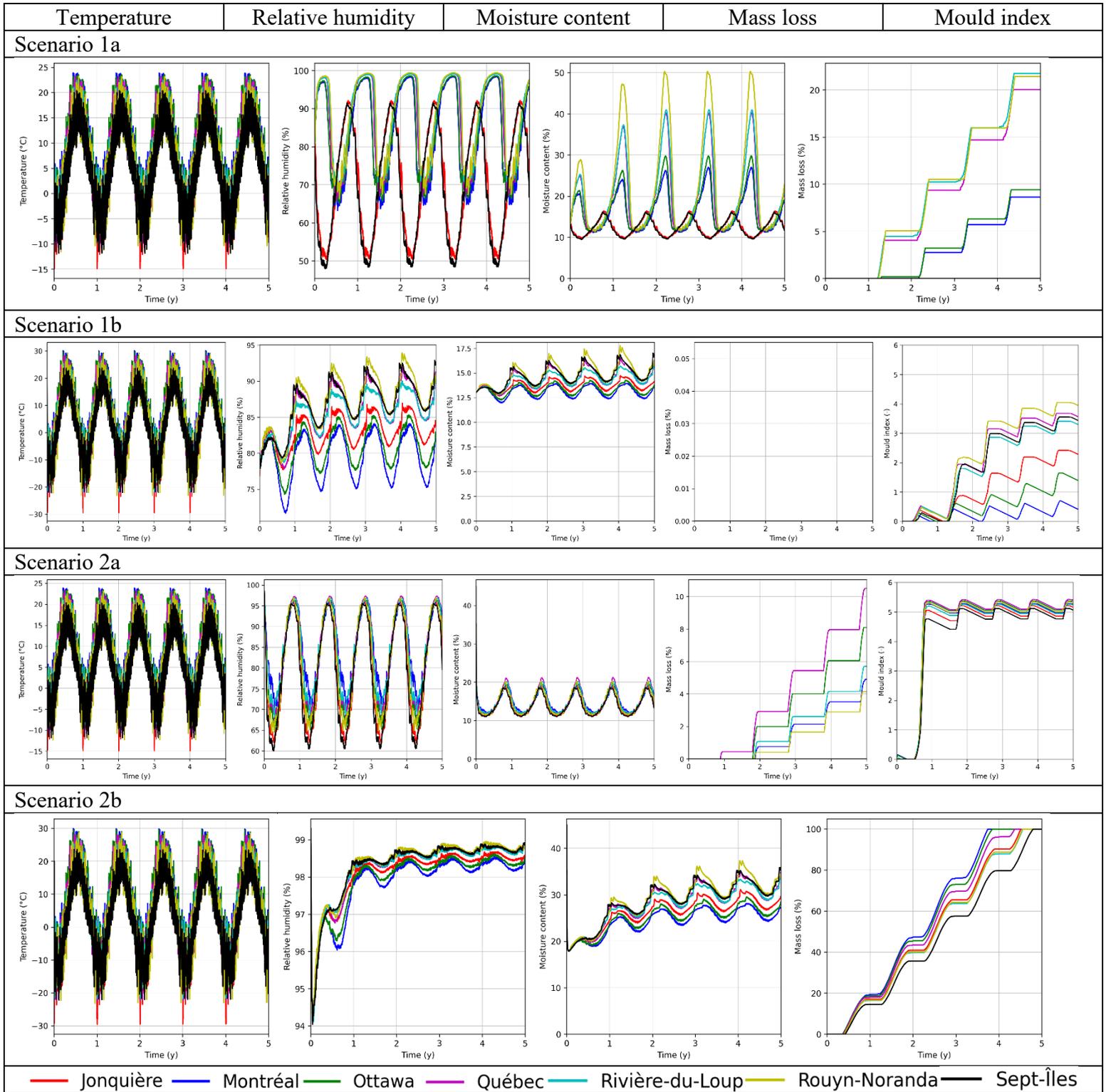


Figure A.14 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 2 (Pine)

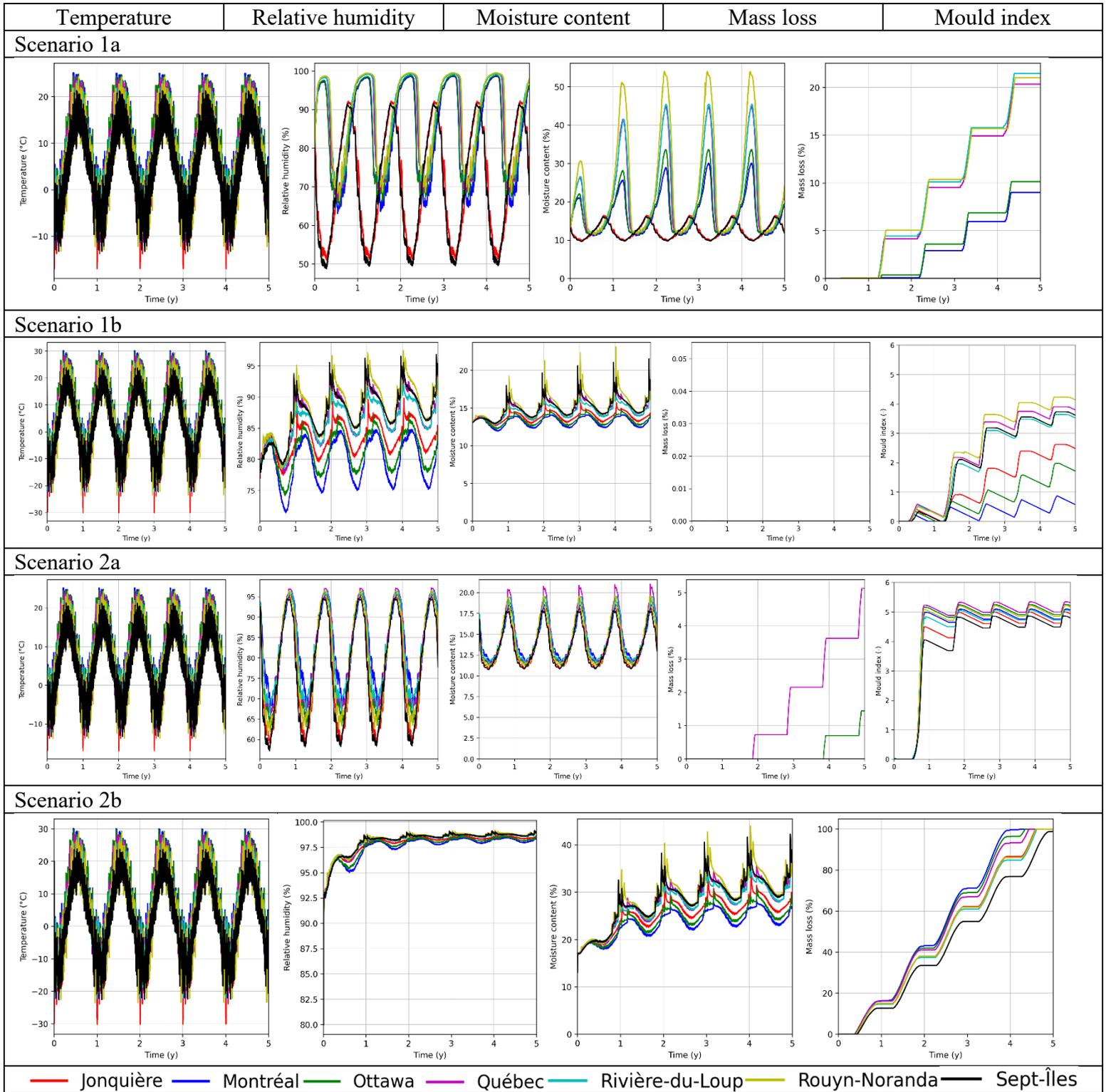


Figure A.15 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 3 (Pine)

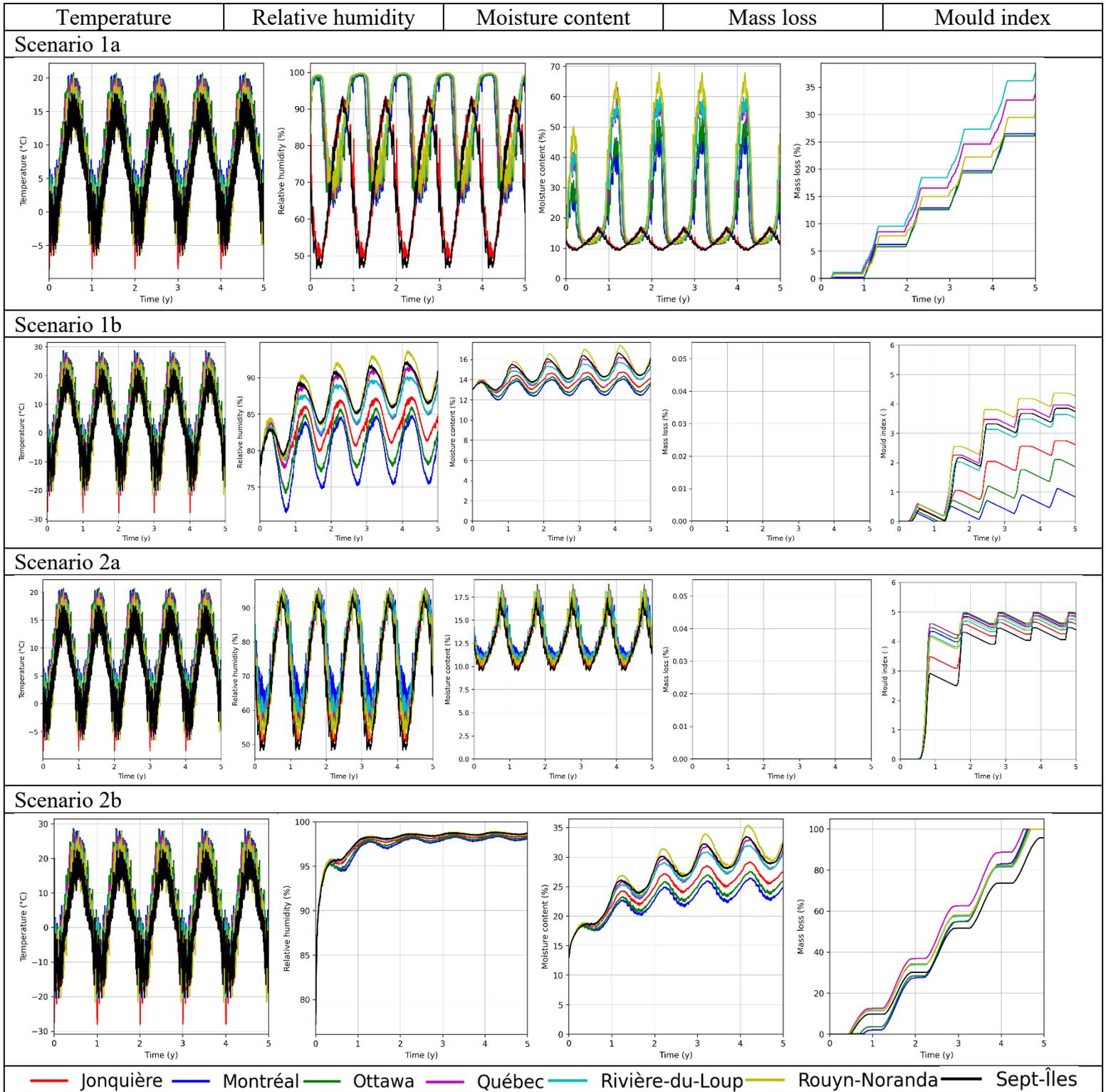


Figure A.16 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 4 (Pine)

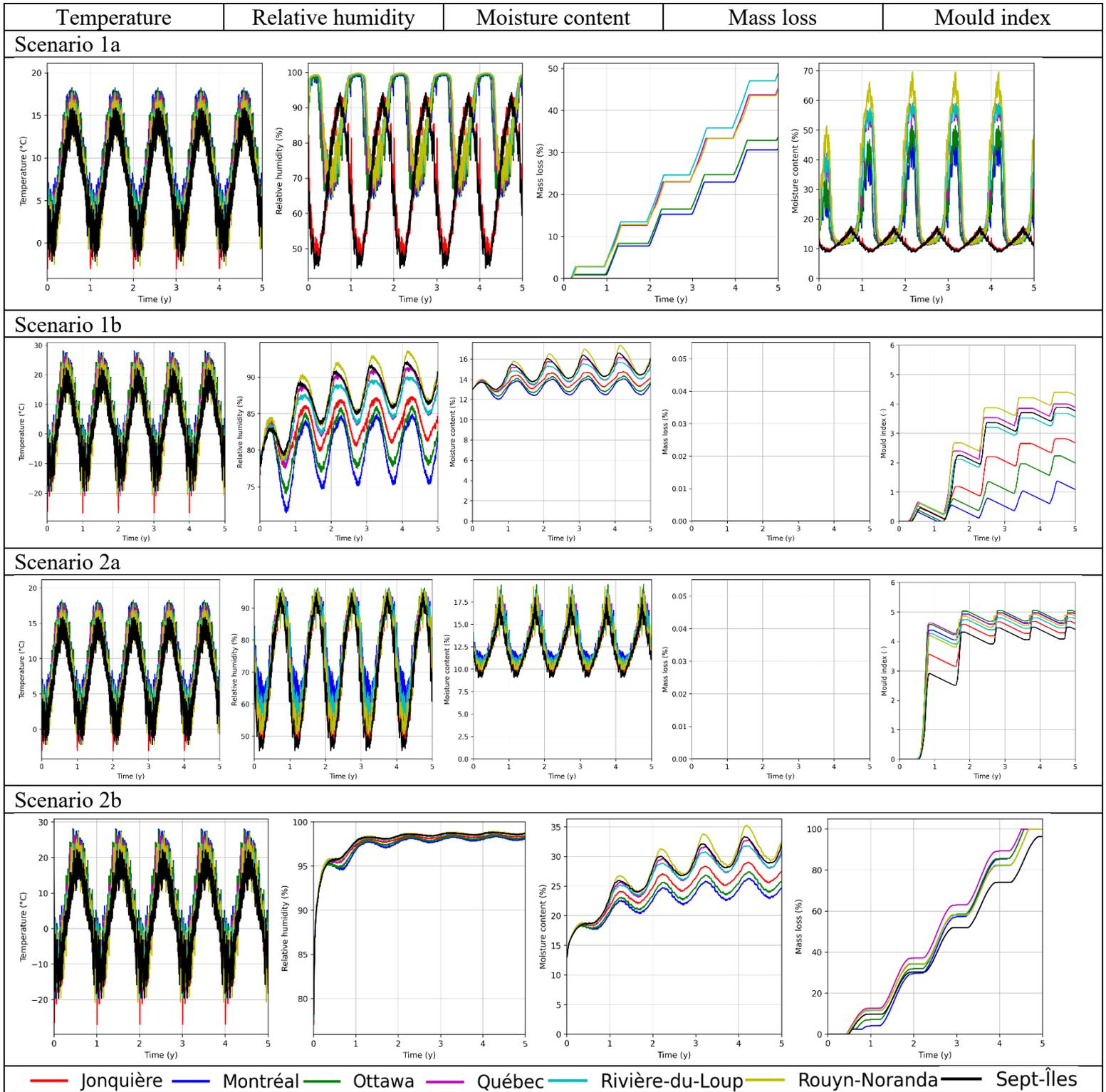


Figure A.17 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 5 (Pine)

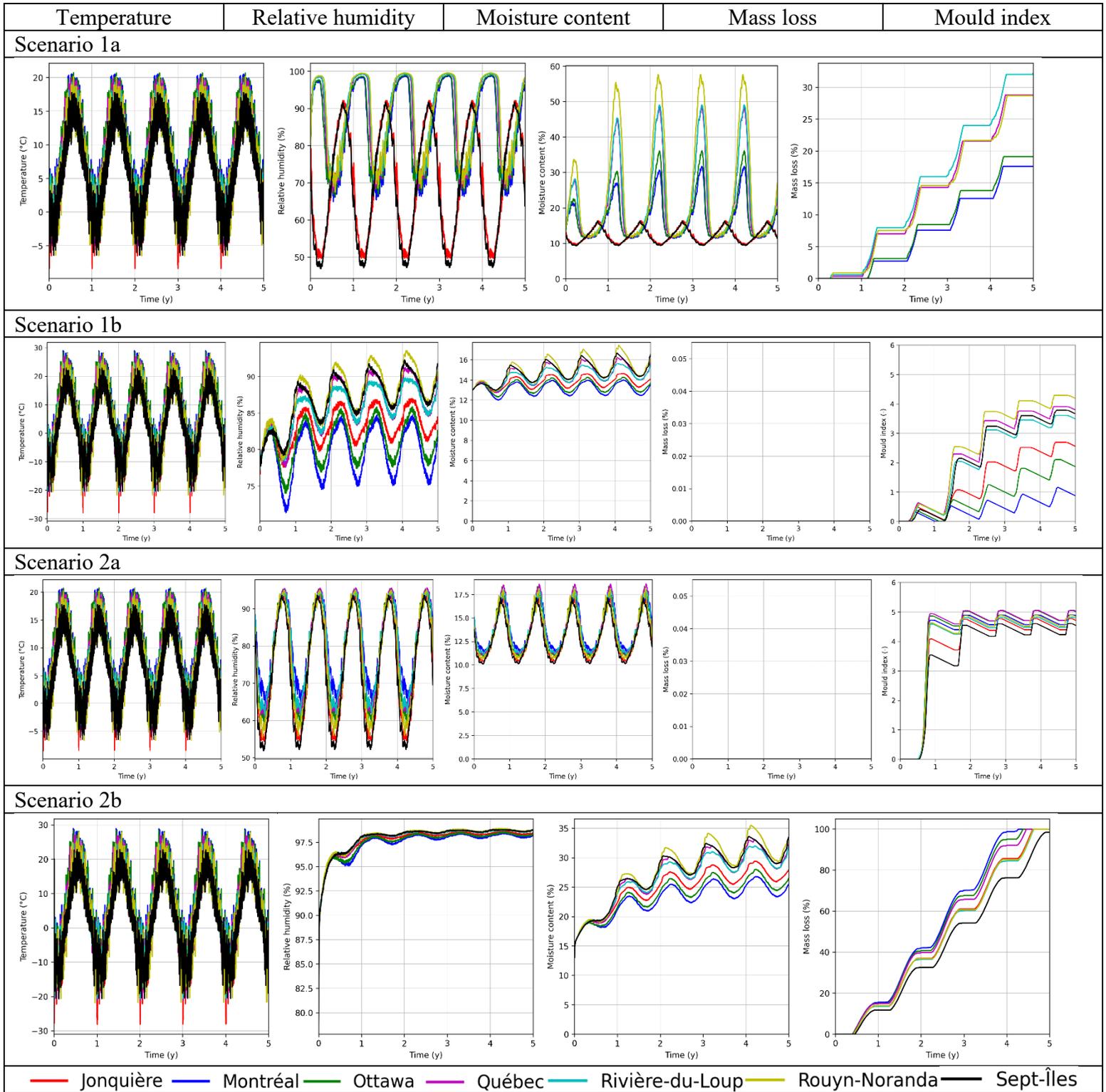


Figure A.18 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 6 (Pine)

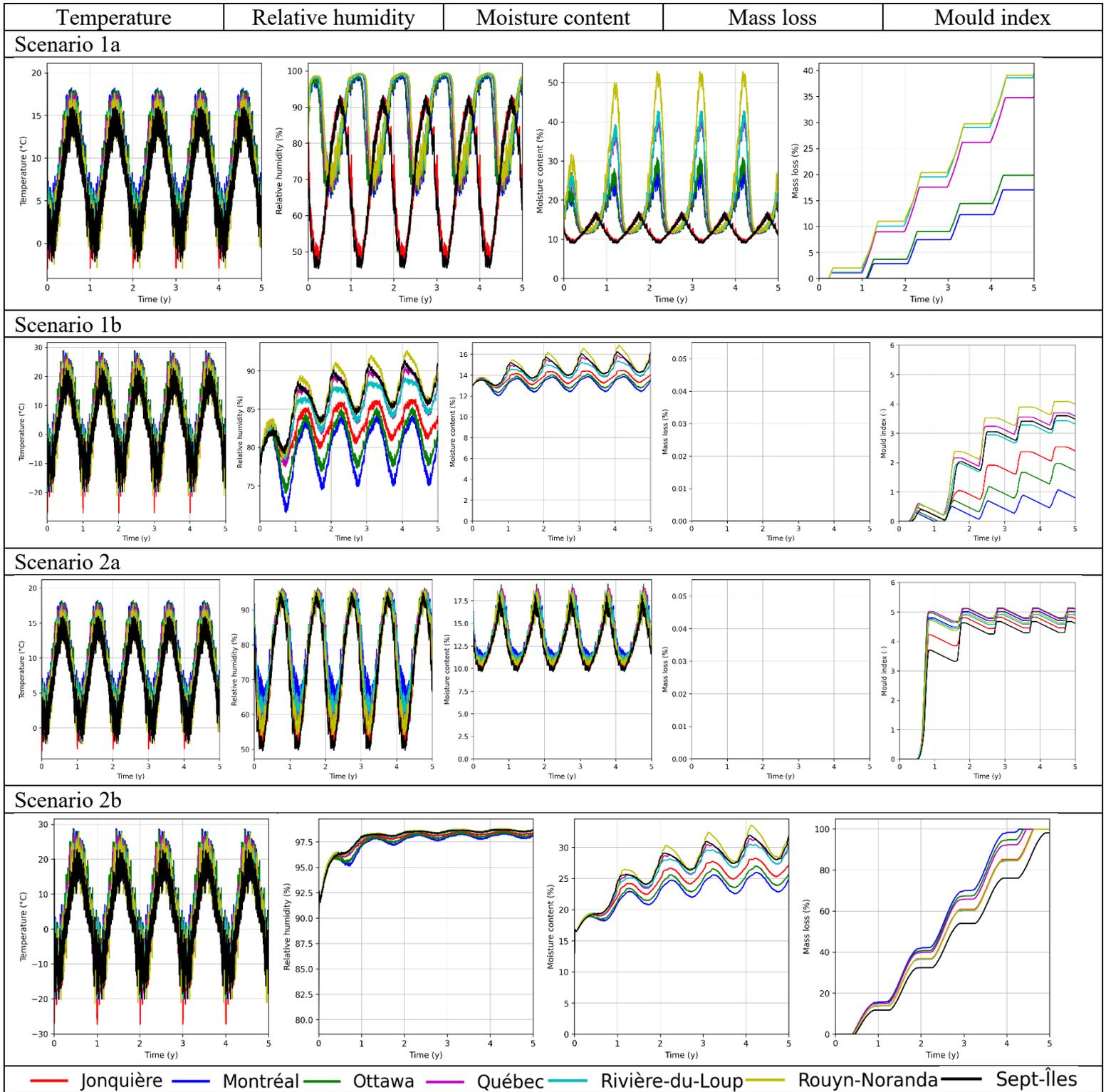


Figure A.19 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 7 (Pine)

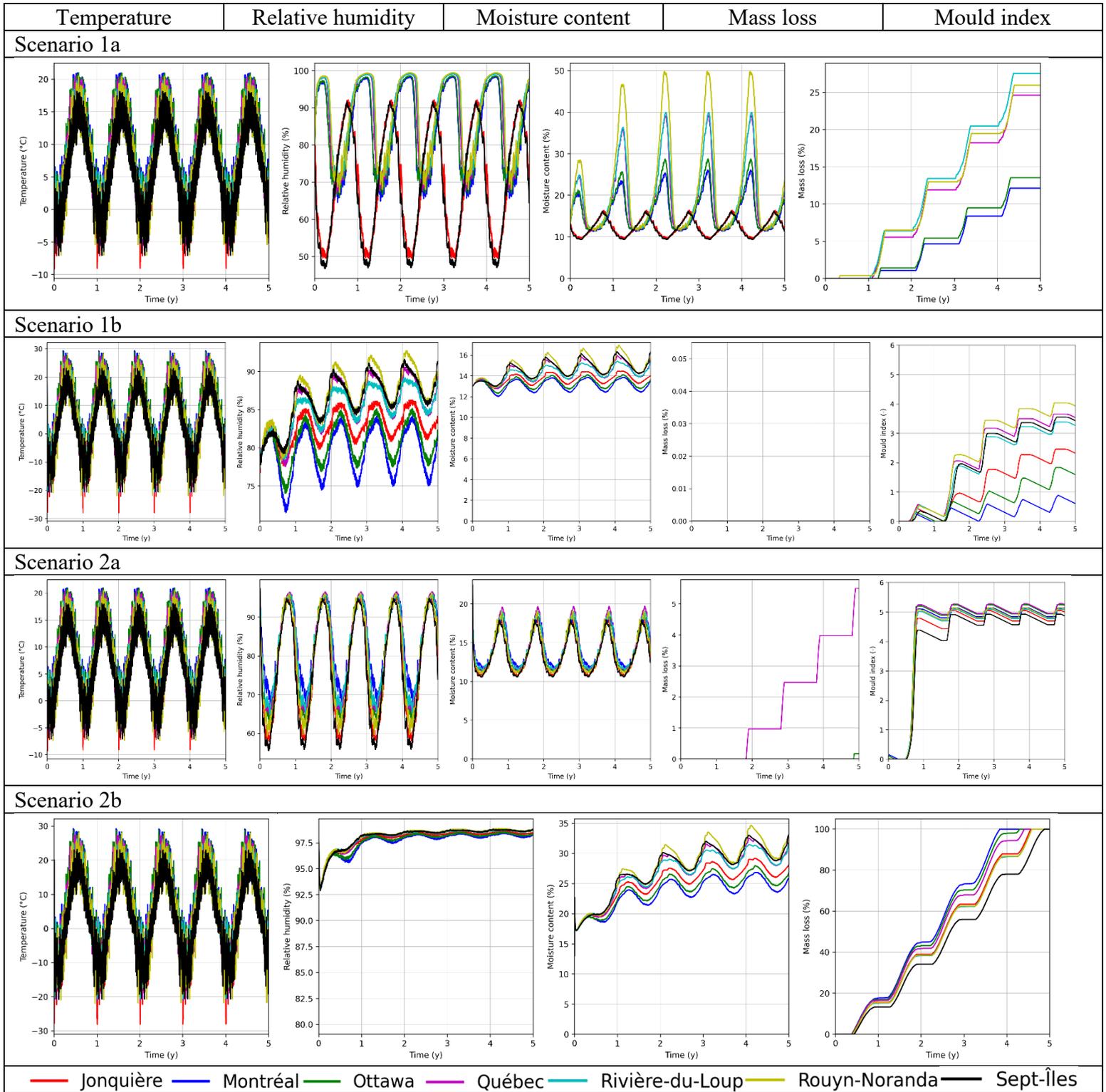
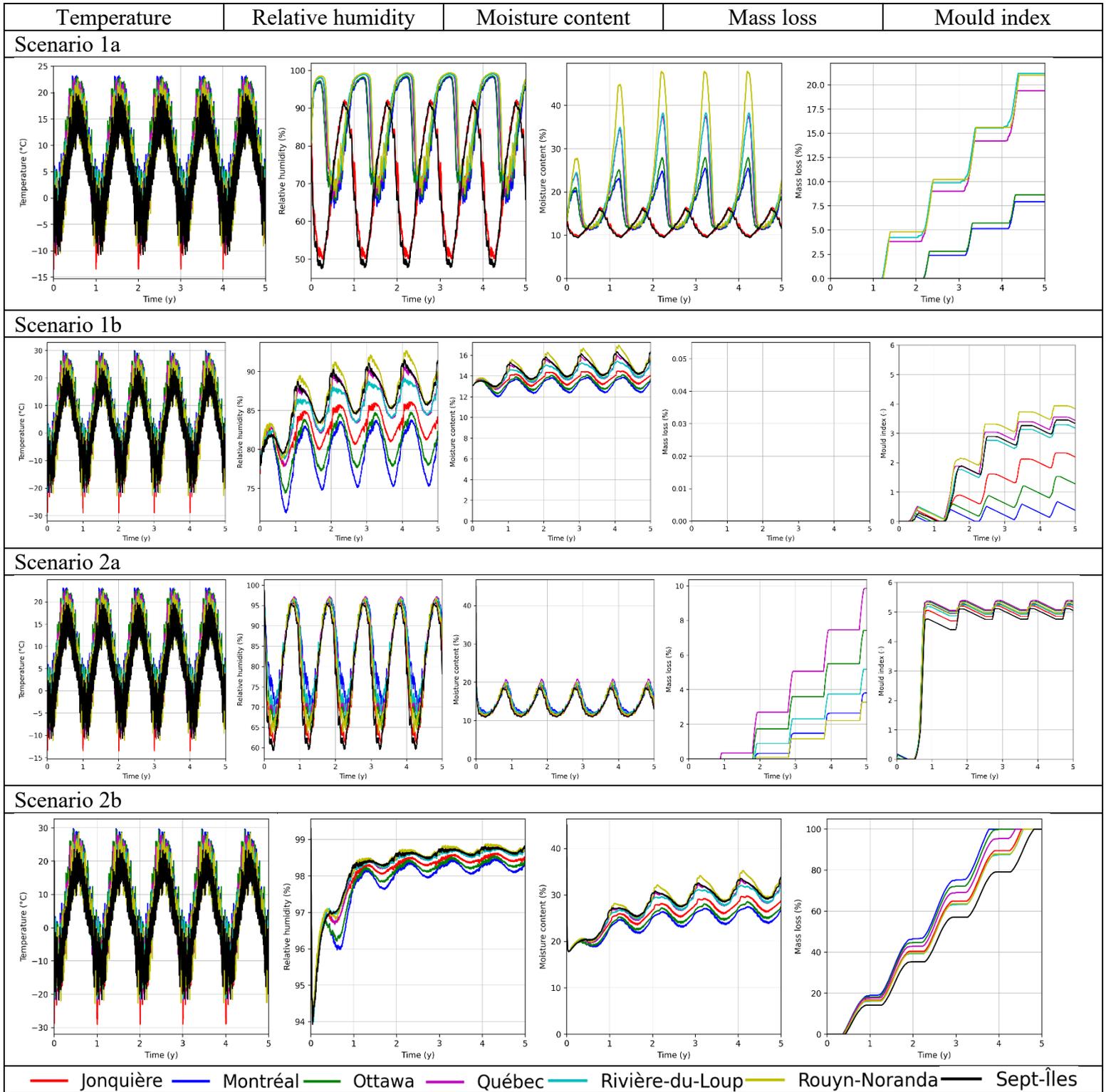


Figure A.20 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 8 (Pine)



15Figure A.21 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 9 (Pine)

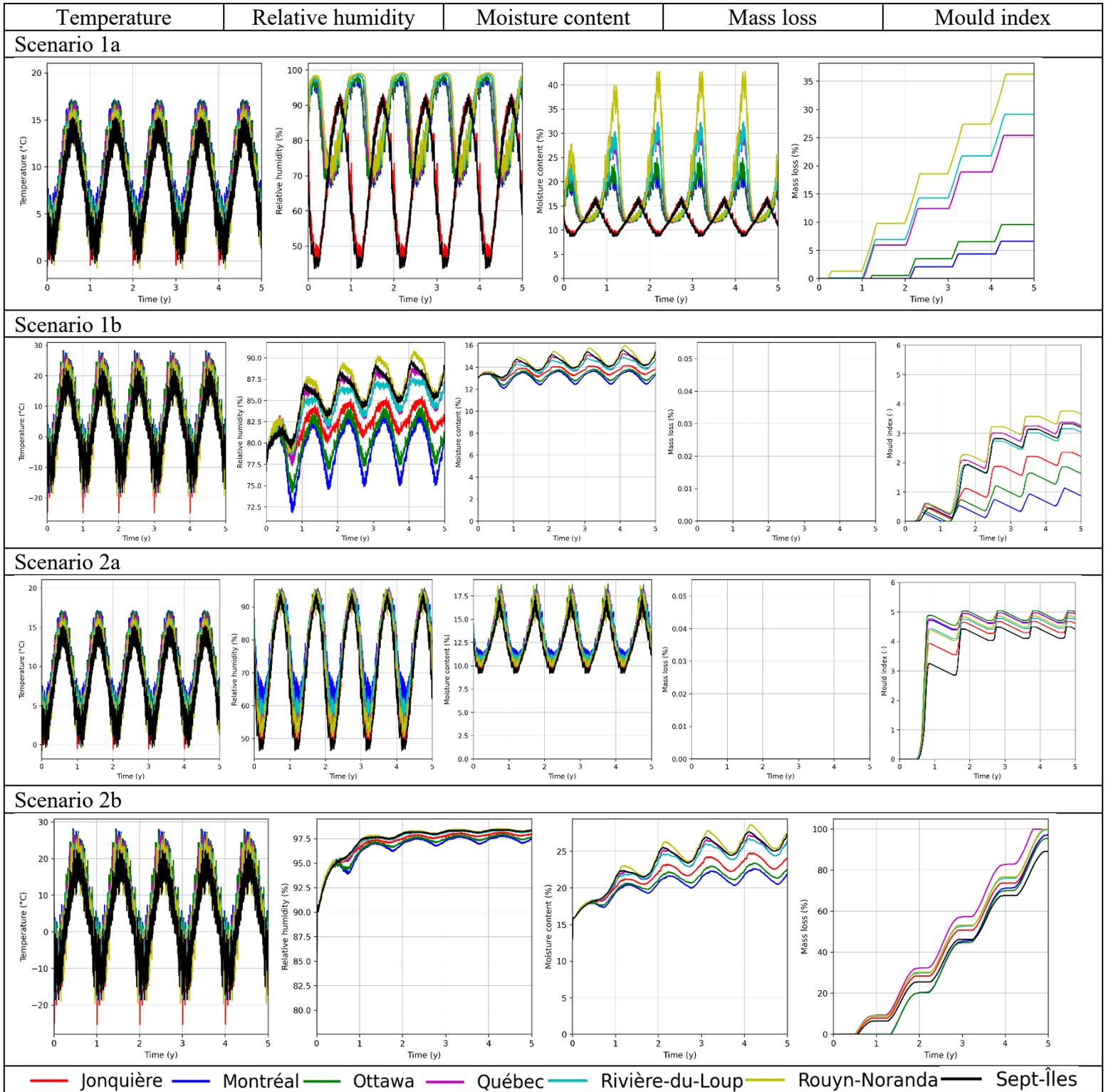


Figure A.22 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 10 (Pine)

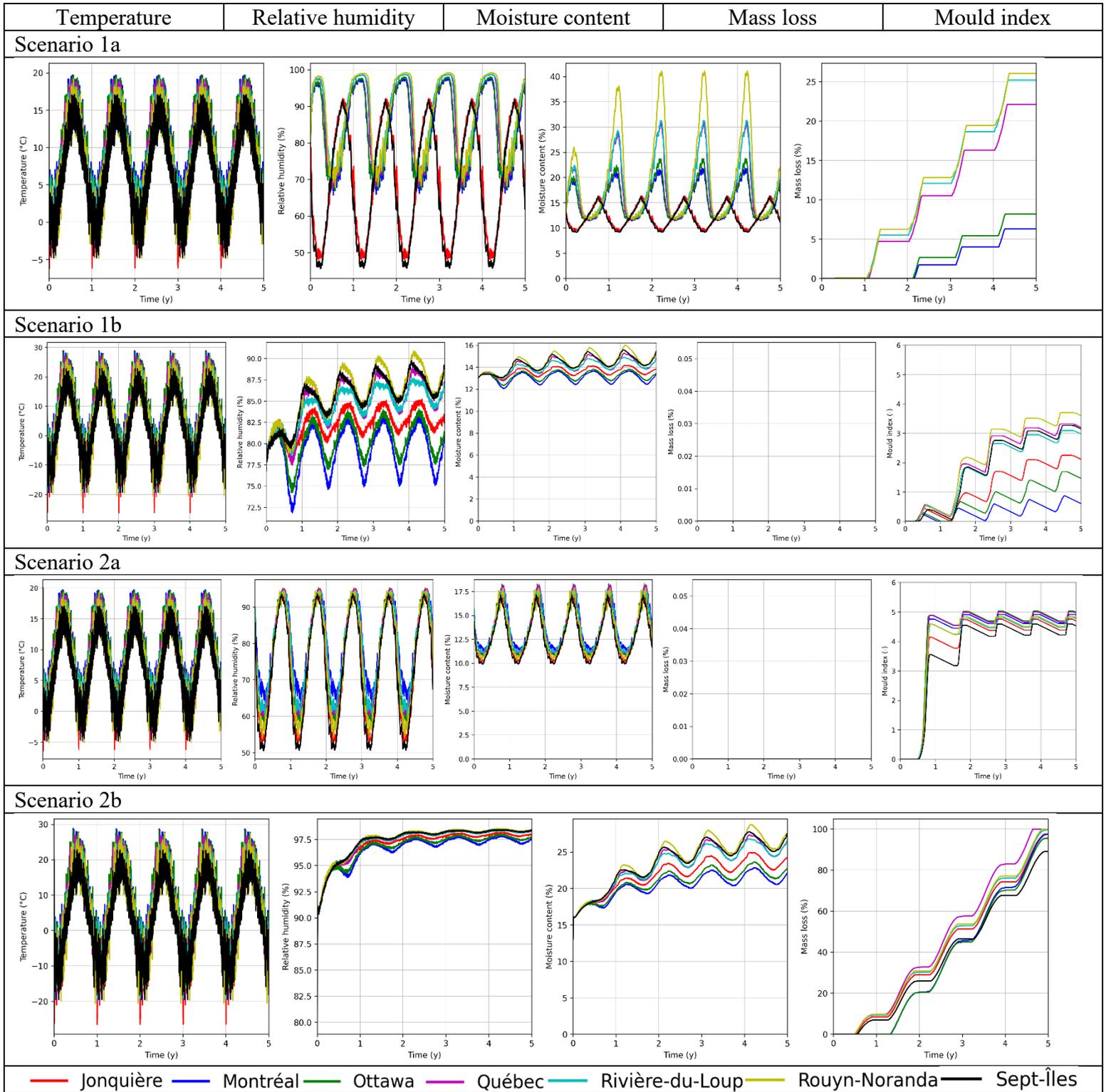


Figure A.23 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 11 (Pine)

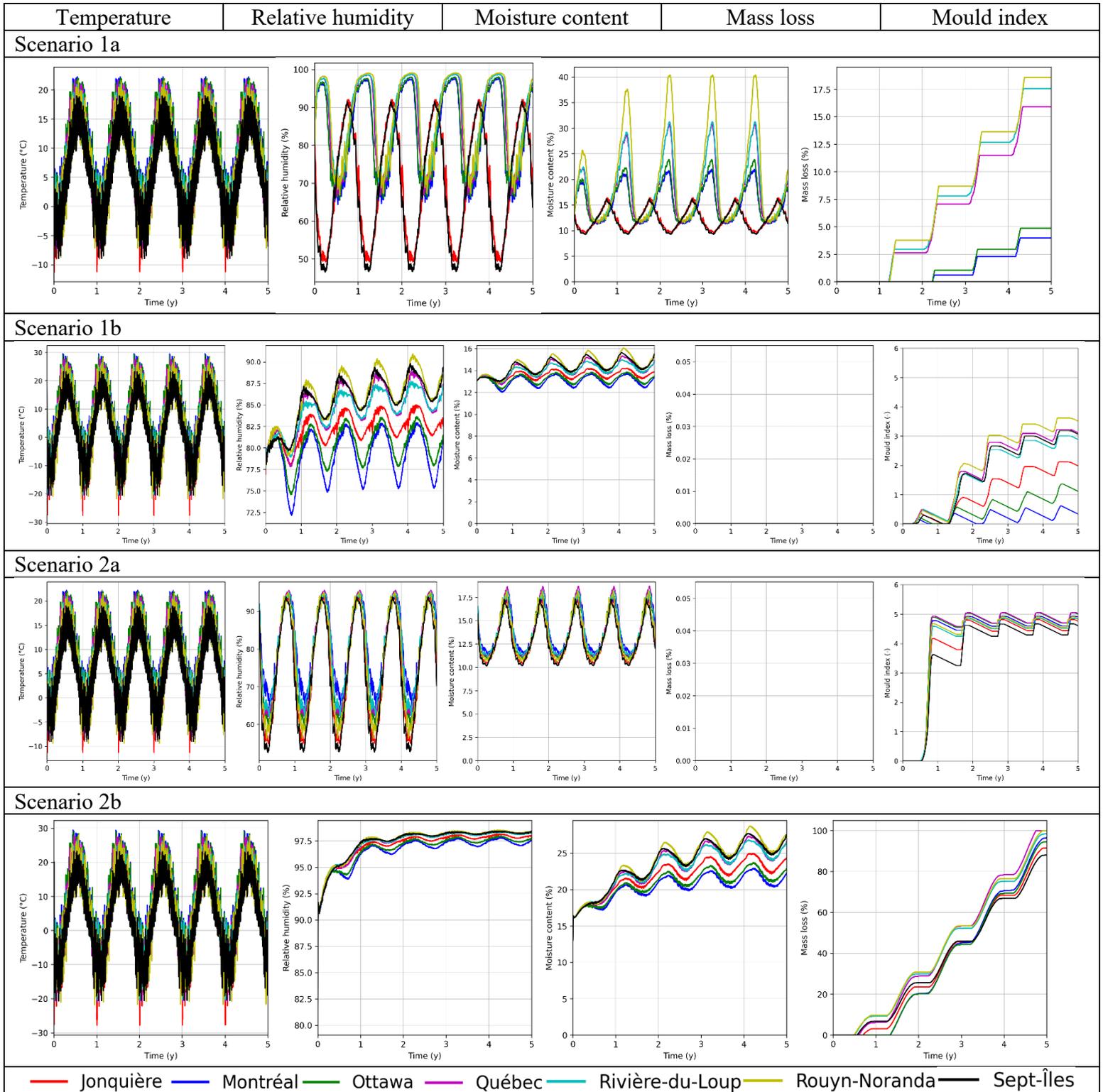


Figure A.24 Comparison of temperature, relative humidity, water content, mass loss and mould index for zone 12 (Pine)