

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

**Systeme d'information géographique comme outils d'analyse des impacts hors
site des opérations minières sur les écosystèmes forestiers**

KADIATOU SOUMAH

Département de Génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme *de Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie Minéral

Avril, 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire intitulé :

Système d'information géographique utilisé comme outils d'analyse des impacts hors site des opérations minières sur les écosystèmes forestiers

présenté par **Kadiatou SOUMAH**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Éric ROSA, président

Isabelle DEMERS, membre et directrice de recherche

Nicole FENTON, membre et co-directrice de recherche

Osvaldo VALERIA, membre et co-directeur de recherche

Vincent BOULANGER-MARTEL, membre externe

DÉDICACE

A ma très chère mère Hadja Bountouraby Bangoura

Que son âme repose en paix, Amen!

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu ma directrice de projet professeure Isabelle Demers, pour sa confiance et de m'avoir donné cette opportunité de réaliser un rêve qui me tenait tant à cœur. C'est le lieu pour moi de vous dire merci du fond du cœur pour votre grande disponibilité, votre encadrement, votre compréhension et surtout pour votre patience. Il me serait difficile de trouver meilleure directrice que vous. Votre précieuse diligence m'a permis de continuer et d'aller jusqu'au bout de ce projet. Tous mes remerciements à ma co-directrice de projet, professeure Nicole Fenton pour son soutien indéfectible, ses critiques constructives et ses précieux conseils. Je tiens à vous dire merci également pour vos interventions significatives et votre encadrement tout au long de ce projet de recherche.

Mes sincères remerciements au professeur Osvaldo Valeria, qui a bien voulu accepter de rejoindre l'équipe d'encadrement à mi-parcours, je vous suis vraiment reconnaissante pour votre importante implication, votre franche collaboration et surtout pour toute l'aide que vous m'avez apporté durant mon passage au Laboratoire de SIG. Un grand merci à Mélanie Desrochers du Centre d'Étude de la Forêt de l'Université du Québec à Montréal pour son précieux soutien et ses judicieux conseils. Votre aide inestimable et vos encouragements ont permis de rester confiante, vous étiez à l'écoute à chaque fois que j'avais besoin d'aide que ça soit sur le plan personnel ou académique. Je vous suis énormément reconnaissante.

Je voudrais ensuite exprimer ma profonde gratitude à tous les professeurs et encadreurs de l'Institut de Recherche en Mine et Environnement pour leurs efforts, à mes collègues étudiants, à toute l'équipe des Laboratoires de SIG et de bryologie pour leur accueil et ces bons moments passés ensemble.

Je profite de cette occasion pour dire un grand merci à toute ma famille plus particulièrement à mon conjoint pour tout son soutien, son accompagnement et ses encouragements. Je ne saurais terminer sans adresser mes remerciements à toutes ces personnes de près ou de loin que je n'ai pas cité ici et qui ont contribué à l'aboutissement de ce projet. Vos conseils et vos soutiens de tous les jours m'ont permis d'avancer malgré certaines dures épreuves de la vie, pendant ces deux années passées loin des personnes qui me sont chères. Je vous dis merci, merci.

RÉSUMÉ

L'industrie minière est une activité qui constitue le moteur de développement de plusieurs pays du monde. Cette activité peut cependant affecter la biodiversité à de multiples échelles spatiales. Les impacts des opérations minières peuvent facilement être détectés à l'emplacement immédiat des installations. En revanche, ces impacts ne sont pas nécessairement limités aux frontières des infrastructures minières.

Les impacts des opérations minières qui sont localisés à l'extérieur des sites miniers, appelés impacts hors site, sont mal connus et donc peu documentés. Souvent ils ne sont pas pris en compte dans les évaluations environnementales conventionnelles. Ces impacts appartiennent à la classification de (Raiter et al., 2014) qui les désignent comme étant des « impacts énigmatiques ». L'objectif principal de ce projet de recherche était tout d'abord d'évaluer l'ampleur des impacts hors site des opérations minières sur des écosystèmes forestiers typiques de la région de l'Abitibi et du Nord du Québec, et plus spécifiquement, de caractériser la zone se trouvant à proximité des sites miniers. Pour répondre à cet objectif, nous avons tout d'abord procédé à la description des sites miniers mis à l'étude dans cette recherche à savoir : Canadian Malartic, LaRonde, Casa Berardi, Joutel, Lapa et Akasaba. Sur la base des études antérieures réalisées par Yin et collaborateurs en 2021, il a été démontré que la zone d'influence des mines sur la communauté du sous-bois pouvait s'étendre sur une distance de 200m à partir des abords des infrastructures minières. Grâce aux outils d'analyse spatiale de ArcGIS et de la carte écoforestière, la distance de 250 m à proximité de chaque site minier a été subdivisée en 25 zones de 10 m chacune à partir des abords des installations minières. Les données disponibles dans la carte écoforestière associées aux variables suivantes : les types de couvertures forestières, la classe d'âge des forêts et les types de terrains, ont été extraites pour chaque zone.

Pour comprendre si les impacts observés à proximité des sites miniers sont causés par les opérations minières, la caractérisation du paysage forestier immédiat non perturbé des sites miniers a été réalisée. Pour cela, cinq superficies de la taille d'une mine type basée sur les cas d'études ont été distribuées aléatoirement tout autour des sites miniers. Les mêmes attributs ont été extraits et moyennés pour chacune des superficies et ont ensuite servis de référence pour chaque site minier. Les valeurs minimum, moyenne et maximum ont été comparées aux observations pour chaque zone de 10 m entre la situation à proximité et celle d'une zone éloignée (non impactée) du site minier.

L'analyse des résultats montre que les zones proches des infrastructures minières, plus spécifiquement celles comprises entre 10 m à 150 m, sont les plus affectées par les opérations minières pour les types de couvertures forestières et les types de terrain, tandis que les classes d'âge des forêts ne montrent pas de grandes différences. Pour la majorité des sites miniers, par exemple Canadian Malartic, Casa Berardi et LaRonde qui sont des mines en opération, il a été constaté que les pourcentages de distribution relative des résineux et des feuillus sont faibles à proximité des installations minières. Ceux-ci augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne des abords des sites miniers. Pour les terrains anthropisés, les pourcentages de distribution relative sont considérablement élevés sur toute la distance analysée (250 m à partir des frontières des sites miniers).

Quant à Joutel qui est une mine à ciel ouvert fermée depuis 1998, il a été constaté de faibles variations de pourcentage entre les zones proches et celles éloignées des abords des infrastructures minières pour les feuillus, les mixtes et les résineux. Cependant la distribution des terrains anthropisés restent aussi très élevés aux abords des anciennes installations. Pour la mine Lapa qui est une mine souterraine en phase de fermeture, il a été constaté que le paysage forestier à proximité n'est pas beaucoup affecté par les impacts hors site. Toutefois, la classe des terrains dénudés humides a montré des distributions semblables aux sites de référence. Pour Akasaba, des variations peu considérables ont été remarquées pour toutes les variables étudiées et sur toute la distance analysée à proximité du projet minier.

Finalement, la présente étude a permis d'approfondir les connaissances sur l'empreinte spatiale des mines dans les régions d'Abitibi et du nord du Québec; en se basant sur des approches multidisciplinaires notamment en foresterie, en mine et en géomatique. Les résultats obtenus ont réussi à démontrer un effet proche des installations, des recherches additionnelles pourraient être conduites pour préciser les meilleures actions à prendre afin de minimiser les impacts hors site des opérations minières sur le paysage forestier.

Mots clés : Opérations minières, impacts hors site, paysage forestier, analyse spatiale, carte écoforestière, système d'information géographique, ArcGIS.

ABSTRACT

The mining industry is a powerful driver for development in several countries around the world. This industry can, however, affect biodiversity at multiple spatial scales. The impacts of mining processes can easily be detected at the immediate location of the facilities. On the other hand, these impacts are not necessarily limited to the boundaries of mining infrastructures.

The impacts of mining operations that are located outside mining sites, which are called off-site impacts, are less visible, poorly known and therefore poorly documented. They are often not considered in conventional environmental assessments. These impacts were classified by Raiter et al., 2014 who defined them as “enigmatic impacts”. The main objective of this research project was to assess the extent of the off-site impacts of mining operations on forest ecosystems typical of the Abitibi region and Northern Quebec, and more specifically, to characterize the area located near the mining sites under study. To achieve this objective, the first step was to describe the mining sites studied in this research. Then, using the spatial analysis tools of ArcGIS and the ecoforestry maps, a distance of 250 m near each mining site was subdivided into 25 zones of 10 m each from the edges of the mining installations. Data associated with the following variables: types of forest cover, age class of forests and types of land, were identified for each zone.

To understand whether the impacts observed near mining sites are truly caused by mining operations, the characterization of the undisturbed forest landscape near the mining sites was carried out. To do this, five areas, the size of a typical mine based on the case studies were distributed randomly around the mining sites. The same attributes were extracted and averaged for each surface area and then served as a reference for each mining site. The minimum, average and maximum values were compared with the observations for each 10 m zone between the nearby situation and that of a remote (unimpacted) zone of the mining site.

The analysis of the results showed that areas close to mining infrastructures, more specifically those between 10 m to 150 m, were the most affected by mining operations in terms of the type of forest cover and the type of terrain, while the age of the forests did not show great differences. For many mining sites, namely Canadian Malartic, Casa Berardi and LaRonde, it was found that the relative distribution percentages of softwoods and hardwoods are low near the mining installations. These percentages increase as we move away from the surroundings of the mining sites. For

anthropized lands, the relative distribution of percentages is considerably high over the entire distance analyzed (250 m from the borders of the mining sites).

As for Joutel, which is an open pit mine closed since 1998, small variations in percentage of forest types were noted between areas close to and those far from the surroundings of the mining infrastructures for hardwoods, mixed trees, and softwoods. However, the distribution of anthropized land also remains very high around the old installations. For the Lapa mine, which is an underground mine in the closure phase, it was found that the nearby forest landscape is not highly affected by off-site impacts. However, for this mining site, the coniferous and mixed classes showed distributions well above the average for the control sites, but the peatland class showed distributions similar to the control sites. For Akasaba, slight variations were noted for all the variables studied and over the entire distance analyzed near the mining project.

Finally, this study has deepened the knowledge on the spatial footprint of mines in the regions of Abitibi and northern Quebec; based on multidisciplinary approaches, particularly in forestry, mining, and geomatics. The results obtained succeeded in demonstrating an effect near mining installations; additional research could be conducted to specify the best actions to take in order to minimize the off-site impacts of mining operations on the forest landscape.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES ABBRÉVIATIONS.....	xvii
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et problématique	1
1.2 Objectifs	8
1.2.1 Objectif général	8
1.2.2 Objectifs spécifiques	8
1.3 Hypothèse de recherche	8
1.4 Contenu du mémoire	9
1.5 Originalité et contributions scientifiques du projet.....	9
2. REVUE DE LITTÉRATURE.....	10
2.1 Description du concept de la modélisation spatiale	10
2.1.1 Concept théorique de la modélisation spatiale.....	10
2.1.2 TYPES DE MODÈLES	11
2.2 Travaux antérieurs avec le logiciel ArcGIS et la modélisation spatiale dans le domaine minier	15
2.3 Études antérieures réalisées sur les impacts hors site des mines en Abitibi et au nord du Québec.....	18

2.3.1 Aperçu général.....	18
2.3.2 Description des écosystèmes échantillonnés autour de chaque site minier	19
2.3.3 Principales conclusions des travaux et les besoins en recherche	20
3. MATÉRIELS ET MÉTHODES	21
3.1 La zone d'étude	21
3.2 Description des sites miniers mis à l'étude	22
3.2 Méthodes	30
3.2.1 Caractérisation du paysage forestier à proximité de chaque site minier.	30
3.2.2 Comparaison du paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence.	39
4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	41
4.1 Caractérisation du paysage forestier à proximité de chaque site minier.	41
4.1.1 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Canadian Malartic.....	41
4.1.2 L'âge des forêts à proximité du site minier Canadian Malartic.....	42
4.1.3 Les types de terrains à proximité du site minier Canadian Malartic.	43
4.1.4 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier de LaRonde.....	44
4.1.5 L'âge des forêts à proximité du site minier LaRonde.....	45
4.1.6 Les types de terrains à proximité du site minier LaRonde	46
4.1.7 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Casa Berardi	47
4.1.8 L'âge des forêts à proximité du site minier Casa Berardi.	48
4.1.9 Les types de terrains à proximité du site minier Casa Berardi.....	49
4.1.10 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Joutel.....	50
4.1.11 L'âges des forêts à proximité du site minier Joutel.	51
4.1.12 Les types de terrains à proximité du site minier Joutel.	52
4.1.13 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Lapa	53

4.1.14 L'âge des forêts à proximité du site minier Lapa.	54
4.1.15 Les types de terrains à proximité du site minier Lapa.....	55
4.1.16 Les types de couvertures forestières à proximité du projet minier Akasaba.	56
4.1.17 L'âge des forêts à proximité du projet minier de Akasaba.	57
4.1.18 Les types de terrains à proximité du projet minier Akasaba.	58
4.1.19 Sommaire des résultats.....	60
4.2 Comparaison du paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence	61
4.2.1 Caractérisation du paysage forestier des sites de référence	61
4.2.2 Paysage forestier à proximité des sites miniers versus le paysage des sites de référence.63	
5. DISCUSSION DES RÉSULTATS	66
5.1 Caractérisation du paysage forestier à proximité de chaque site minier.	66
5.1.1 Les sites miniers actifs	66
5.1.2 Les mines fermées	68
5.1.3 Le projet minier	69
5.2 Autres aspects influençant le paysage forestier autour des sites miniers.	70
6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	71
6.1 Rappel des objectifs et conclusion de l'étude	71
6.2 Limites et recommandations de l'étude	72
7. RÉFÉRENCES.....	74
8. ANNEXES	84
Annexe A : Fiche de collecte des informations sur les sites miniers	84
Annexe B : Caractérisation des six mines à l'étude, en Abitibi et au Nord-du- Québec.	86
Annexe C : Modèle conceptuel de mine en Abitibi et au nord du Québec	89

Annexe D : Figures montrant la différence entre le paysage à proximité des sites miniers et celui des sites témoins.	90
Annexe E : La liste complète de la classe de types de terrains du Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs (2015).....	114

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Récapitulatif de quelques travaux antérieurs avec SIG et la modélisation spatiale...</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2 : Codes des cartes écoforestières et leurs descriptions (tiré du dictionnaire de la carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023).</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3: Codes et leurs descriptions de la classe d'âge des peuplements forestiers (tiré du dictionnaire carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023).....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 4 : Codes et leurs descriptions de la classe codes de terrain (tiré du dictionnaire de la carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023)</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 5 : Sommaire des résultats obtenus</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 6 : Récapitulatif des types de couvertures forestières, âge des forêts et types de terrains pour les sites de référence.</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 7 : Quelques exemples des cas de figures.....</i>	<i>63</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Schéma simplifié d'une mine à ciel ouvert (tiré de Charbonneau, 2014).....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2 : Schéma simplifié d'une mine souterraine (tiré de Charbonneau, 2014)</i>	<i>4</i>
<i>Figure 3 : Illustration de la méthode de superposition (Chrisman, 2014)</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 : Représentation graphique des modèles spatiaux dans ArcGIS ModelBuilder (Salgado & Gilbert, 2013) . a : processus de modèle simple et b : processus de modèle complexe.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 : Modèle graphique d'adéquation (Tomlin, D. C., 2017).....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 6 : Pourcentage de répartition des écosystèmes forestiers échantillonnés autour de chaque site minier.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 7 : Carte de la zone d'étude</i>	<i>21</i>
<i>Figure 8 : Vue aérienne du projet Akasaba sur image Google Earth (2024).</i>	<i>23</i>
<i>Figure 9 : Vue d'ensemble des installations minières prévues à Akasaba (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014).</i>	<i>23</i>
<i>Figure 10 : Vue aérienne du site de Casa Berardi sur image Google Earth (2024).....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 11 : Vue d'ensemble des infrastructures minières de surface sur le site minier de Casa Berardi (Archambault-Giroux et al., 2019)</i>	<i>25</i>
<i>Figure 12 : Vue aérienne du site minier de Canadian Malartic sur image Google Earth (2024).</i>	<i>26</i>
<i>Figure 13 : Vue d'ensemble des infrastructures minières de Canadian Malartic, (Arseneault et al., 2021). A= Zone de concassage, B= Zone d'entreposage du minerais, C=Usine de traitement du minerais, D=Parc a résidus, E=Bureaux et garage, F= Fosse Canadian Malartic, G=Fosse barnat, H=Halde stérile.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 14 : Vue aérienne du site minier LaRonde sur image Google Earth (2024).</i>	<i>28</i>
<i>Figure 15 : Vue d'ensemble des infrastructures minières de LaRonde,(Agnico Eagle Ltée, 2023) A= Puits Penna, et bureaux ; B= parc a résidus et bassins de polissage; C=Usine de concentration; D= Usine de remblais en pâte et garage d'équipement mobile.</i>	<i>28</i>
<i>Figure 16 : Vue aérienne du site Lapa sur image Google Earth (2024).....</i>	<i>29</i>

<i>Figure 17 : Vue aérienne du site Joutel sur image Google Earth (2024).</i>	30
<i>Figure 18 : Schéma simplifié de la démarche utilisée.</i>	31
<i>Figure 19 :Schéma simplifié pour déterminer les types de couvertures forestière (tiré du Ministère des forêts de la faune et des parcs, 2015).</i>	34
<i>Figure 20 : Les attributs du paysage forestier utilisés dans la présente étude (tiré du dictionnaire de la carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023)</i>	38
<i>Figure 21 : Shema simplifié de la marche utilisée</i>	40
<i>Figure 22 : Distribution de la classe du type de couvertures forestières à proximité du site minier Canadian Malartic.</i>	42
<i>Figure 23 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier Canadian Malartic.</i>	43
<i>Figure 24 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité du site minier Canadian Malartic</i>	44
<i>Figure 25 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du site minier LaRonde.</i>	45
<i>Figure 26 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier LaRonde.</i>	46
<i>Figure 27 : Distribution de la classe de types de terrain en fonction des zones à proximité du site minier LaRonde.</i>	47
<i>Figure 28 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du site minier Casa Berardi.</i>	48
<i>Figure 29 Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier Casa Berardi.</i>	49
<i>Figure 30 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité du site minier Casa Berardi.</i>	50
<i>Figure 31 Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité de l'ancien site minier Joutel.</i>	51
<i>Figure 32 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité de l'ancien site minier Joutel.</i>	52

<i>Figure 33 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité de l'ancien site minier Joutel.</i>	53
<i>Figure 34 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du site minier Lapa.</i>	54
<i>Figure 35 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier Lapa.</i>	55
<i>Figure 36 Distribution de la classe de types de terrains à proximité du site minier Lapa.</i>	56
<i>Figure 37 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du projet minier Akasaba.</i>	57
<i>Figure 38 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du projet minier de Akasaba.</i>	58
<i>Figure 39 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité du futur site minier Akasaba.</i>	59
<i>Figure 40 : Niveau de différence du paysage forestier à proximité des sites miniers.</i>	65
<i>Figure 41 : Schéma simplifié de la succession végétale primaire modifié de (Chapin et al., 2012).</i>	68

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

AC : Automates cellulaires ;

AEM: Agnico Eagle Mines;

AHP: Analytical hierarchical process;

AMC : Association minière du Canada;

AMC: Analyse Multi Critère;

CSST : Commission de la santé et de la sécurité au travail;

CVA : Change vector analysis;

DMA : Drainage minier acide;

DNC : Drainage neutre contaminé;

ISQ : Institut de la Statistique du Québec;

MCM: Mine Canadian Malartic;

MDDELCC : Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques;

MERN : Ministère de l'énergie et des ressources naturelles.

MRNF: Ministère des ressources naturelles et de la forêt;

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

NDWI: Normalized Difference Water Index.

PA: Potentiel aquifère;

pH : potentiel d'hydrogène;

SIG : Système d'Information Géographique;

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte et problématique

L'exploitation minière constitue un secteur crucial de l'économie de plusieurs États. Elle produit des biens et services vitaux pour la subsistance de l'homme. Le Canada est reconnu comme l'un des principaux pays miniers au monde avec plus de soixante minéraux et métaux exploités pour une valeur de près de 55,5 milliards de dollars en 2021 (Association minière du Canada, 2021). La même année, plus de 2,1 milliards de dollars ont été investis dans l'exploration minérale au Canada. Les métaux précieux (principalement l'or) étaient les plus recherchés, comptant pour 65 % des dépenses (Ressources naturelles du Canada, 2023).

En 2016, la province du Québec était la deuxième productrice minérale la plus importante du Canada, comptant 27 mines actives et générant 7,8 milliards de dollars de revenus (Association minière du Canada, 2021). Au cours de l'année 201, la valeur des productions minérales au Québec a atteint 11,91 milliards de dollars. Compte tenu du contexte géologique favorable dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord du Québec, plusieurs sociétés minières s'y sont établies pour exploiter diverses ressources minérales comme l'or, le cuivre, le zinc, le diamant, le nickel. Du point de vue de la valeur de la production minérale, l'Abitibi-Témiscamingue a occupé en 2019, la troisième place des régions administratives, avec 2,78 milliards de dollars, soit 23,3 % de la valeur totale de la production minérale québécoises (Institut de la statistique du Québec, 2021).

Malgré les retombées économiques positives découlant des activités de l'industrie minière, ses impacts négatifs sur l'environnement et la biodiversité ne doivent pas être sous-estimés. Ces impacts peuvent être très nuisibles pour l'environnement et la biodiversité se trouvant autour des sites miniers. En effet, la préparation du site pour les opérations de la mine (ouverture des pistes d'accès, excavation pour les fosses à ciel ouvert, construction des parcs à résidus etc.) est un processus qui modifie les conditions abiotiques et biotiques et qui, dans certains cas, est à l'origine du déclin d'espèces et d'écosystèmes rares (Sonter et al., 2018).

L'industrie minière et ses activités annexes affectent la biodiversité à de multiples échelles spatiales (site, paysage, régional et mondial). A l'échelle mondiale, elles se présentent comme l'une des principales activités anthropiques à l'origine des fortes pertes de la couverture forestière (Mishra et al., 2022). Parmi ses impacts sur les écosystèmes forestiers, les plus remarquables sont entre autres

la mortalité des arbres (Nascimento & William, 2004), la génération de la poussière (Ghose & Majee, 1998), la contamination des sols et de l'eau. Notons que ce dernier enjeu est un problème majeur, généré principalement par le drainage minier acide (DMA) (Akcil & Koldas, 2006).

Les impacts des opérations minières sur l'environnement peuvent se produire durant tout le cycle de vie de la mine. Ils menacent davantage la biodiversité pendant la phase d'exploitation de la ressource minérale (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 2016). L'exploitation d'une ressource minérale comporte généralement plusieurs étapes, soit l'exploration, le développement et la construction, l'exploitation et la fermeture/réhabilitation (Association minière du Canada, 2021).

1- **La phase d'exploration** : est un processus long et coûteux, c'est une phase qui a pour objectif la recherche et la découverte de nouveaux gisements économiquement rentables (Association minière du Canada, 2021). Pendant cette phase plusieurs études préliminaires sont réalisées soit : les levées géophysiques, l'étude des cartes géophysiques, les levées géochimiques (forages diamantés, excavation de tranchées), évaluation de la qualité, du volume et l'étendue du gisement étudié. Lorsque les résultats sont concluants, d'autres travaux importants sont nécessaires pour aboutir aux études de faisabilité (développement). Toutefois, cette phase est rarement couronnée de succès et la majorité des projets miniers se limiteront à cette étape si les résultats d'étude ne sont pas encourageants (Association minière du Canada, 2023). Pendant la phase d'exploration, la biodiversité est généralement moins impactée car aucune activité d'envergure n'est encore visible sur le terrain, mais aussi très peu d'informations existent sur le sujet. Cependant, il faut signaler les bruits et vibrations des machines de forage qui peuvent constituer une source de pollution sonore et de poussières (Chaire en éco-conseil, 2012).

2- **La phase de développement** : Cette phase consiste à effectuer d'autres recherches et analyses plus pointues dont l'aboutissement est l'évaluation finale de la mine projetée. Les résultats de ce processus détermineront si la mine sera construite ou pas. Durant cette étape, plusieurs travaux sont entrepris soit : l'élaboration d'un plan de la mine, les consultations publiques (communautés et gouvernement), l'obtention des autorisations et les licences auprès du gouvernement. Généralement cette étape est mise à profit pour la caractérisation du milieu biologique naturel du site minier et la réalisation des évaluations environnementales avant le début de la construction des infrastructures minières.

3- **La phase d'exploitation** : est une phase pendant laquelle plusieurs techniques sont employées pour l'extraction et le traitement de la ressource minérale. Partout au Québec, l'octroi du bail minier à un promoteur pour débiter les travaux est assujéti à plusieurs critères du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) et du ministère de l'énergie et des ressources naturelles (MERN) dont entre autres : un plan de restauration approuvé et le versement d'une garantie financière couvrant les coûts liés à la restauration du site minier. Cette étape génère sans doute plusieurs impacts sur la biodiversité à savoir : morcellement des habitats, pollution des eaux (surface et souterraines), pollution et érosion du sol, pollution de l'air (poussière, gaz à effet de serre), pollution sonore (bruit et vibration) etc. (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 2016). Dépendamment de l'emplacement de la ressource minérale, l'extraction peut s'effectuer de deux façons soit à ciel ouvert (ressource proche de la surface) ou souterraine (ressource en profondeur) comme le montrent les figures 1 et 2.

L'extraction et le traitement du minerais produit une grande quantité de résidus solides et liquides déposés en surface. Ces résidus représentent des sources potentielles d'instabilités géotechniques et géochimiques. Ils peuvent constitués des sources de contaminants des eaux de surface et souterraines, et par le fait même, des risques environnementaux considérables (Tardif-Drolet et al., 2020). Les résidus solides sont formés d'abord des stériles miniers (roches concassées à faible teneur ou ne contenant pas de ressource minérale) et entreposés en pile selon leur catégorie dans un endroit spécifique sur le site minier. L'autre type de résidus solides sont les rejets de concentrateur, qui proviennent du traitement du minerais à l'usine, ils sont formés de pulpe avec un contenu en eau plus ou moins grand (résidus filtrés, résidus densifiés). Ces résidus sont entreposés dans des endroits adéquatement aménagés à cet effet (parcs à résidus) sur le site minier (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, 2020).

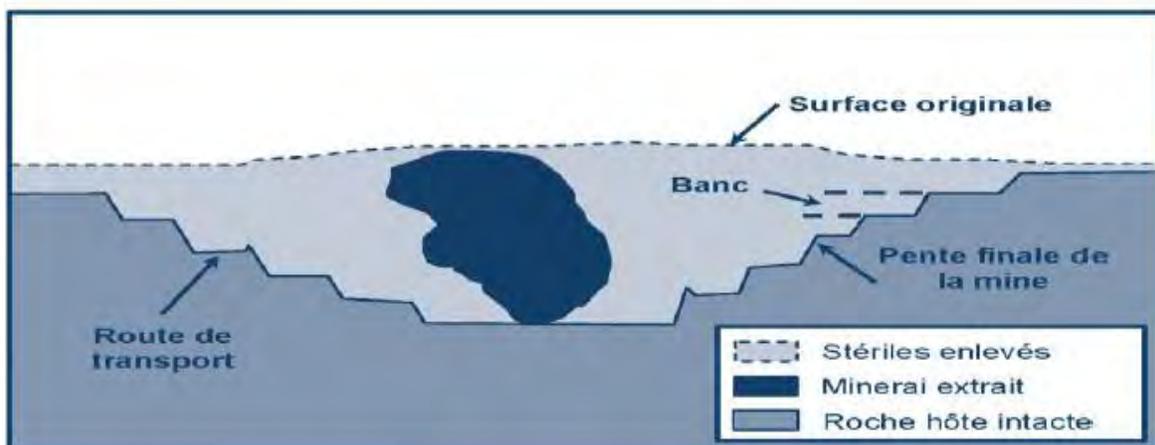


Figure 1 : Schéma simplifié d'une mine à ciel ouvert (tiré de Charbonneau, 2014).

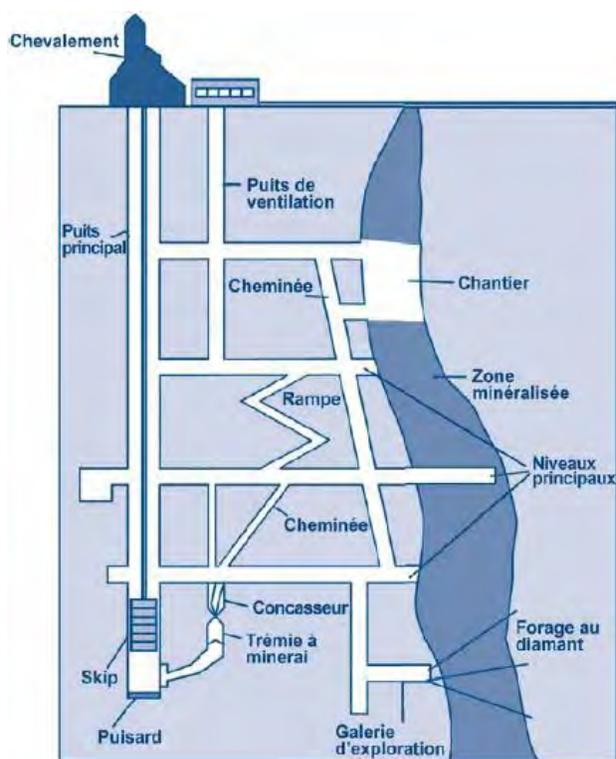


Figure 2 : Schéma simplifié d'une mine souterraine (tiré de Charbonneau, 2014)

4- **La phase de fermeture et restauration du site** : constitue la dernière étape du cycle de vie de la mine. Lorsque les activités de production sont arrêtées sur un site minier, les travaux de restauration et de suivi sont entrepris pendant plusieurs années. Le démantèlement des infrastructures, la fermeture de quelques pistes d'accès, la stabilisation chimique et la végétalisation sont entre autres des activités à mener pour atteindre un état satisfaisant. Cette phase du cycle de

vie est mise à profit pour restaurer les milieux biologiques et physiques perturbés pendant la phase de l'exploitation minière (Mdaghri, 2008). Pour la plupart des cas il est très difficile voire impossible de reconstituer les écosystèmes originels de ces milieux perturbés.

C'est pourquoi depuis plusieurs décennies, les chercheurs et les promoteurs miniers travaillent continuellement afin de mettre en place des techniques et technologies adéquates permettant de réduire les impacts négatifs des activités minières sur les écosystèmes forestiers. Ces impacts sont très complexes et peuvent varier d'une mine à une autre en fonction des techniques d'exploitation (ciel ouvert, souterraine), l'écosystème dans lequel les opérations se déroulent, les types de stériles et rejets de concentrateur, et autres. Dans la province du Québec par exemple, ce sont plusieurs millions de tonnes de rejets miniers (rejets de concentrateur, stériles miniers) et des dépôts meubles qui sont produits chaque année du fait d'activités liées à l'exploitation minière. La plus grande partie de ces rejets est entreposée adéquatement dans des aires d'accumulation aménagées à cet effet (Li et al., 2002). Au Québec, ces aires d'entreposage occupent une surface non négligeable des espaces où s'effectuent les opérations minières, soit plus de 13 000 hectares (Li et al., 2002).

Lorsque les rejets miniers contiennent des minéraux sulfureux et sont exposés aux conditions du milieu ambiant (air, pluie), la présence de l'eau et de l'oxygène favorise l'oxydation des sulfures, et génère par la suite le phénomène de drainage minier acide (DMA). Ce drainage minier est caractérisé principalement par un pH faible et une forte concentration en contaminants (sulfates et métaux dissous). Il provoque par la suite l'acidification des sols entraînant la solubilité des métaux toxiques qui deviennent alors disponibles pour les plantes (Zhuang et al., 2009). Le DMA peut être à cet effet une source potentielle de contamination du sol et de l'eau. D'importantes concentrations des métaux lourds peuvent être observés à plusieurs kilomètres des sites miniers (Escarré et al., 2011). La présence des métaux lourds dans le sol pourrait avoir un effet sur la communauté végétale environnante. Cette présence induirait la perte d'espèces indigènes et pourrait créer ainsi un environnement favorable à l'introduction et la prolifération d'espèces exotiques rudérales, qui modifient le fonctionnement des écosystèmes (Hooper et al., 2005). Le drainage minier acide est sans doute le plus grand défi environnemental de l'exploitation minière depuis plusieurs décennies (Nordstrom et al., 2015).

Il faut aussi mentionner le drainage neutre contaminé (DNC), qui est quant à lui caractérisé par un pH proche de la neutralité mais avec des concentrations supérieures aux normes en métaux dissous

(Plante, 2010). Bien que le pH ne soit pas acide, le DNC peut être considéré comme une source de pollution potentielle pour les milieux récepteurs. Il faut aussi signaler les contaminants atmosphériques qui peuvent être générés par le soulèvement de poussières des rejets miniers entreposés et lors du transport du minerai par les camions.

Jusqu'à présent, la plupart des recherches ont examiné les impacts au niveau des sites, émergeant directement de la perte et de la dégradation des habitats (Sonter et al., 2018). Toutefois, tous ces impacts ne sont pas nécessairement limités aux frontières des sites miniers et ils peuvent s'étendre sur de longues distances. Les impacts hors site des opérations minières sont moins remarquables, moins connus et donc peu documentés. Cette catégorie d'impact fait partie de la classification de Raiter et al. (2014) qui les qualifie d'« impacts énigmatiques ». Ces impacts sont définis par les auteurs comme étant des impacts écologiques qui passent sous les radars des évaluations environnementales conventionnelles, et il les a classifiés en quatre catégories comme suit :

- La première catégorie est constituée d'impacts dit faibles mais qui agissent de manière cumulative;
- La deuxième catégorie regroupe les impacts qui se situent en dehors des zones directement impactées par les projets d'envergure et qui ne sont pas pris en compte dans les évaluations environnementales ;
- La troisième catégorie comprend les impacts qui ne sont pas détectables avec les méthodes classiques, les paradigmes et les échelles spatio-temporelles utilisés pour les détecter;
- La dernière catégorie, renferme les impacts dits secondaires, ils sont facilement détectables, pas directement causés par les impacts du développement, mais qui sont facilités par ceux-ci.

Dans la forêt boréale, les travaux de (Yin et al., 2022), ont démontré que les effets synergiques des impacts hors site des opérations minières peuvent contribuer aux changements dans la composition de la forêt boréale. Cependant, il est à noter que plusieurs phénomènes sont à la base des changements dans la composition de la forêt boréale à l'échelle globale. Ces causes sont entre autres : des incendies de forêts, la déforestation provoquée par l'agriculture et l'étalement urbain, des changements globaux de températures et de précipitations. En effet, au cours des prochaines décennies la prédominance relative des arbres à feuilles caduques dans les forêts boréales devrait augmenter, la composition des peuplements passant ainsi des conifères aux feuillus (Baltzer et al., 2021). Dans le sud de la forêt boréale, le passage des tourbières aux peuplements forestiers est

également un scénario possible pour les changements de végétation (Ratcliffe et al., 2017). Les travaux de Baltzer et collaborateur réalisés en 2021, ont mentionné que les changements rapides observés dans la composition de la forêt boréale sont causés par l'intensification des feux de forêts et les changements climatiques. Dans les régions boréales de l'Amérique du Nord par exemple, où les incendies sont plus fréquents et très violents, la dominance de l'épicéa noir a cédé la place aux espèces de feuillus avec des répercussions sur les fonctions des écosystèmes (Baltzer et al., 2021).

Cependant, dans le domaine de l'écologie historique, il est mentionné que les changements de composition des forêts ont débuté depuis plusieurs années. Les travaux de (Marchais et al., 2020) ont démontré que la partie est de l'Amérique du Nord a connu d'importantes modifications de la composition de la forêt boréale pendant et après la colonisation. Les auteurs ont signalé que la présence des conifères (épicéa) a fortement diminuée, laissant la place aux feuillus majoritairement répandus (peuplier faux-tremble) dans cette partie de la forêt boréale.

En considérant ces précédentes observations, il est indispensable de se questionner sur la distribution spatiale des impacts hors site des opérations minières dans le paysage forestier minier. Toutefois, il est aussi important de s'interroger si les changements observés dans le paysage forestier minier sont causés par les opérations minières ou s'ils sont causés par les effets des changements climatiques et des perturbations naturelles. C'est pourquoi ce projet d'étude a été initié pour évaluer l'ampleur des impacts des infrastructures minières sur les écosystèmes forestiers de la région de l'Abitibi et du Nord du Québec.

Dans cette étude, des analyses spatiales détaillées du paysage forestier à proximité de six sites miniers ont été réalisées avec le logiciel ArcGIS. En premier lieu, la caractérisation des sites miniers et des écosystèmes se trouvant à proximité a été effectuée. Par la suite, à travers un projet cartographique et la carte écoforestière du ministère des forêts, l'ampleur des impacts des infrastructures minières sur les écosystèmes forestiers, plus spécifiquement sur la végétation arborée à proximité des sites miniers a été évaluée. Les variables comme le type de couvertures forestières (résineux, feuillus et mixtes), la classe d'âge des forêts (0-30 ans, 31-70 ans et 70 ans et plus) et les types de terrains (anthropisés et dénudés humiques) ont été retenues pour cette étude. Des analyses comparatives entre le paysage à proximité et celui des sites de référence autour de chaque site minier ont été effectuées. Les résultats obtenus ont été examinés selon les spécificités et les attributs du paysage forestier se trouvant tout autour de chaque site minier. Ces analyses ont

permis de mieux comprendre la répartition spatiale des impacts hors site des opérations minières sur la végétation arborée autour des mines et permettre d'explorer les opportunités à envisager pour réduire l'empreinte spatiale des mines dans la forêt boréale.

1.2 Objectifs

1.2.1 Objectif général

En se basant sur le contexte préétabli, la présente étude va développer des approches pour améliorer la compréhension sur les impacts hors sites des opérations minières sur la végétation arborée dans les régions de l'Abitibi Témiscaminque et du Nord du Québec. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les impacts des infrastructures minières sur des écosystèmes forestiers typiques de la région de l'Abitibi et du Nord du Québec via une représentation spatiale du paysage forestier.

1.2.2 Objectifs spécifiques

Pour répondre à cet objectif général, deux objectifs spécifiques ont été définis:

- 1- Caractériser le paysage forestier à proximité de chaque site minier à l'aide des outils d'analyse spatiale;
- 2- Comparer le paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence en se basant sur les attributs du couvert végétal.

1.3 Hypothèse de recherche

En lien avec l'objectif principal identifié ci-dessus, cette étude s'appuie sur l'hypothèse suivante :

Les mines à ciel ouvert actives pourraient avoir une empreinte spatiale plus considérable que les mines souterraines. Cette hypothèse s'explique par le fait que toutes les opérations des mines à ciel ouvert se déroulent en surface. Les activités annexes liées à ce mode d'exploitation de la ressource minérale (utilisation des explosifs, le transport du minerai) constituent des sources potentielles de génération de poussières. Les mines en opération à ciel ouvert affecteraient plus le paysage forestier (végétation arborée) environnant dans sa globalité. Cette hypothèse sera ainsi vérifiée par la caractérisation de la distance de 250 m à partir des abords de chaque infrastructure minière.

Dans la présente étude, la direction des vents dominants n'a pas été pris en compte comme paramètres déterminant, étant donné que sur les emplacements étudiés, tous les vents ont à peu près la même direction.

1.4 Contenu du mémoire

Le présent mémoire est subdivisé en six chapitres. Le premier chapitre qui est l'introduction présente le contexte général de l'étude, les objectifs et le contenu du mémoire.

Dans le chapitre deux, une revue de littérature sur les concepts de modélisations spatiales est présentée. Dans cette partie du mémoire, l'accent sera mis sur la modélisation spatiale utilisée dans différents travaux et études scientifiques en général. Ensuite, les différents types de modèles qui décrivent les processus naturels sont analysés et les résultats des études antérieures effectuées dans le cadre de l'identification de la zone d'influence hors site des opérations minières sur la communauté végétale dans l'ouest du Québec sont exposés. Le chapitre trois exposera la méthodologie utilisée pour aboutir aux résultats de l'étude.

Les résultats sont présentés dans le chapitre quatre et le chapitre cinq est consacré à leur interprétation. Le mémoire se termine avec la présentation des principales conclusions de la recherche ainsi qu'une série de recommandations formulées concernant les défis en recherche afin de trouver les opportunités à exploiter pour réduire l'empreinte spatiale des activités minières sur les écosystèmes forestiers.

1.5 Originalité et contributions scientifiques du projet

Les travaux antérieurs réalisées dans les régions de l'Abitibi Témiscaminque et du Nord du Québec ont contribué à l'identification de la zone d'influence hors site des opérations minières en utilisant exclusivement les espèces du sous-bois (bryophytes) de la forêt boréale (Yin et al, 2022), néanmoins les effets sur la végétation arborée demeurent mal connus. Le présent projet de maîtrise va développer des approches qui permettront d'investiguer les éventuels effets des opérations minières sur la végétation arborée autour des sites minier tout en faisant une distinction entre les types de sites miniers, soit par leurs infrastructures ou leur stade évolutif. Les résultats obtenus permettront d'approfondir les connaissances sur le sujet et serviront d'outils d'aide à la décision pour les projets miniers. Dans un tel contexte, ce projet de recherche revêt une originalité singulière du point de vue environnemental et sociétal.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature présente en premier lieu, les concepts de base de la modélisation spatiale et un résumé des travaux scientifiques avec le logiciel ArcGIS dans différents domaines. Ensuite, les études antérieures réalisées sur les impacts hors site des opérations minières dans les régions de l'Abitibi Témiscaminque et du Nord du Québec seront abordées.

2.1 Description du concept de la modélisation spatiale

2.1.1 Concept théorique de la modélisation spatiale

La modélisation spatiale est une approche qui permet d'effectuer des analyses géospatiales. Elle contribue à la compréhension des mécanismes et des phénomènes à différentes échelles (de régional à global) et aide à la prise de décision. Compte tenu de la diversité et la multitude d'outils disponibles dans le domaine de la modélisation, cette revue présente une brève description des types de modèles souvent utilisés pour expliquer les phénomènes naturels.

Les modèles et les simulations ont servi depuis plusieurs années à la compréhension des impacts potentiels d'un projet d'envergure sur l'environnement, permettant ainsi d'établir un pronostic de l'ampleur et la répartition spatio-temporelle des impacts. Ces modèles et simulations sont habituellement utilisés pour vérifier l'efficacité des mesures proposées en vue d'éviter ou d'atténuer les impacts potentiels des projets. Les travaux de André et collaborateurs en 2020 ont établi une liste non exhaustive des différentes catégories de modèles utilisés généralement dans les sciences de l'environnement :

1. Les modèles littéraires qui se basent sur un texte qui décrit et délimite les problèmes,
2. Les modèles conceptuels qui sont l'expression de la structuration de la pensée et la reconnaissance du problème,
3. Les modèles statistiques qui expliquent les liens qui existent entre les éléments d'un système. Ils peuvent être descriptifs ou prédictifs, et
4. Les modèles mathématiques qui sont la description des relations simples ou complexes. Ils sont adaptés pour simuler différents comportements des systèmes.

Dans les années 1970, le chercheur McHarg a débuté l'utilisation d'une méthode qui est celle de la superposition des cartes (figure 3). Elle a été le point de départ du développement des systèmes d'informatique géographique (SIG). Cette méthode se base sur une technique qui consiste à la

superposition des couches d'information de diverses natures (facteurs géographiques, biologiques, fonciers, utilisation du sol dont l'objectif est de quantifier un espace en fonction d'aptitudes ou de résistances environnementales.

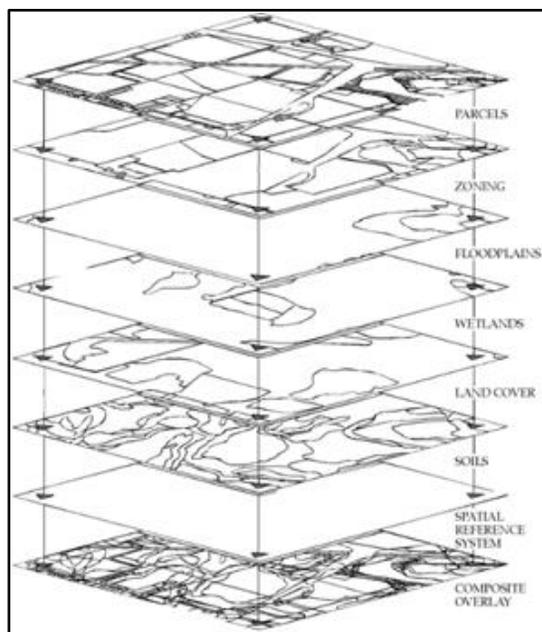


Figure 3 : Illustration de la méthode de superposition (Chrisman, 2014)

Depuis les années 1990, l'utilisation des SIG dans la modélisation est devenue un outil performant de plus en plus appliqué dans les recherches scientifiques. Gharehbaghi et Scott-Young (2018) ont mentionné que l'intégration d'un SIG dans la modélisation d'un programme de suivi des impacts d'un projet devient un atout car son utilisation dès le début des projets permet de choisir les indicateurs environnementaux en conséquence. Cela favoriserait l'analyse en temps réel et permettrait d'apporter des changements en vue d'une gestion adaptée.

Depuis ce temps, plusieurs types de modèles spatiaux et de techniques de modélisation sont devenus disponibles, ce qui attribue au terme "modèle spatial" des interprétations différentes.

2.1.2 TYPES DE MODÈLES

➤ **Modèle de données et modèle de processus**

Un modèle de données est une représentation conceptuelle des entités et de leurs associations. Dans le domaine des SIG, les modèles de données spatiales sont des présentations des relations spatiales. Cette catégorie est constituée des modèles de données vectorielles, les modèles de données

matricielles, les modèles topologiques et les modèles de réseau (Salgado & Gilbert, 2013). Le modèle spatial abordé dans cette revue appartient à la catégorie des modèles de processus qui représentent soit :

- une expression de la manière dont le monde est censé fonctionner, ou
- un flux d'opérations spatiales permettant d'atteindre certains objectifs analytiques.

Dans le premier cas, un modèle spatial formalise les mécanismes des phénomènes géographiques dans des programmes informatiques. De tels modèles spatiaux peuvent représenter divers processus sociaux et naturels tels que le changement de la couverture terrestre, la propagation d'espèces envahissantes et la migration des populations. Dans le second cas, un modèle spatial exprime un flux de travail standard d'analyse spatiale, qui combine diverses opérations spatiales pour calculer des indicateurs ou des prédictions significatives (Salgado & Gilbert, 2013).

La figure 4a montre un processus de modèle simple, qui calcule la pente à partir du modèle numérique d'élévation dans ArcGIS Model Builder. De tels processus de modèle peuvent être combinés en un modèle plus complexe comme celui illustré à la figure 4b qui décrit un modèle composé de plusieurs processus d'analyse.

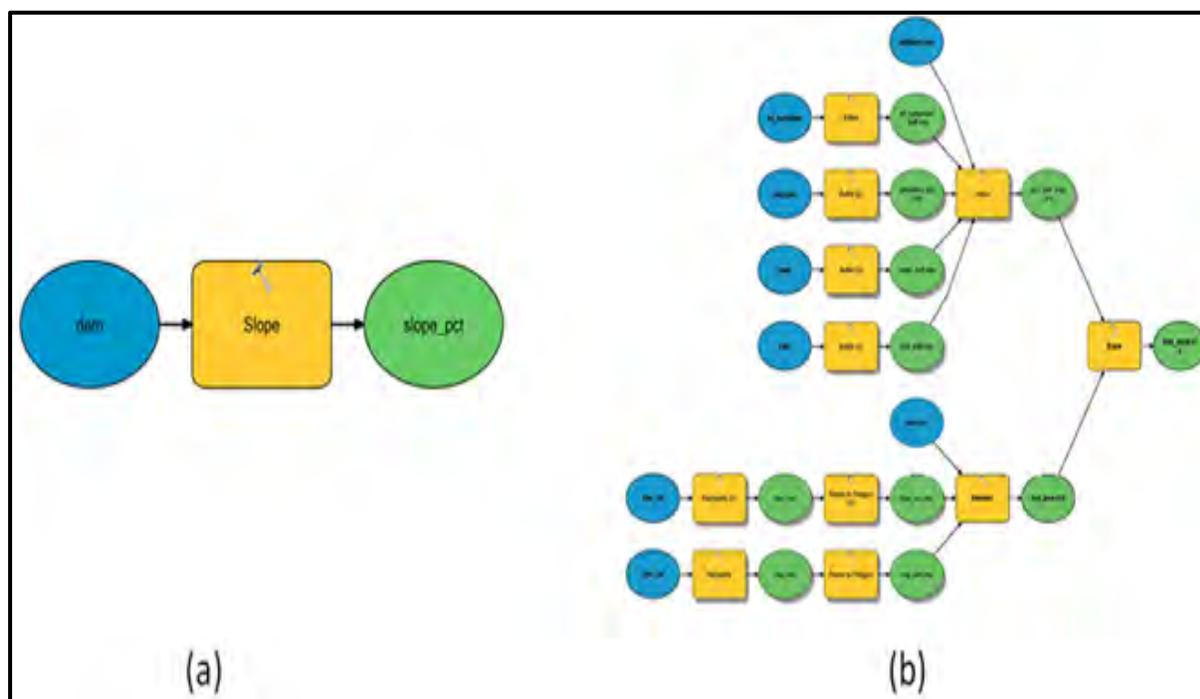


Figure 4 : Représentation graphique des modèles spatiaux dans ArcGIS ModelBuilder (Salgado & Gilbert, 2013) . a : processus de modèle simple et b : processus de modèle complexe.

➤ **Modèle statique et modèle dynamique**

Un modèle statique représente des processus à un moment précis. Les modèles spatiaux statiques sont mis en œuvre sous forme de flux de travail unidirectionnels d'opérations spatiales. L'entrée et la sortie du modèle sont soit implicites dans le temps, soit représentent un seul point dans le temps, par exemple les modèles d'adéquation (voir figure 5).

D'autre part, les modèles dynamiques représentent des processus dynamiques s'actualisant dans le temps. Brown et al. (2005) ont défini cette catégorie comme étant des modèles qui décrivent des phénomènes spatiaux évoluant dans le temps, et sont également appelés modèles spatio-temporels, par exemple les modèles basés sur la dynamique d'occupation du sol.

➤ **Modèle déterministe et modèle stochastique**

Un modèle est déterministe lorsque sa sortie est entièrement déterminée par le modèle sans aléas. La même sortie peut être reproduite en répétant le modèle avec les mêmes entrées et paramètres de modèle. La plupart des modèles statiques sont déterministes et fournissent un résultat unique sans tenir compte de son incertitude.

En revanche, les modèles stochastiques comportent une part aléatoire inhérente qui peut générer des résultats différents lors d'exécutions multiples. Dans un modèle stochastique, une distribution de sorties potentielles peut être dérivée par des simulations de Monte Carlo bien illustré par les travaux de (Toubri et al., 2021). La distribution des sorties indique l'incertitude de la prédiction du modèle.

Comme le caractère aléatoire est largement présent dans les systèmes sociaux et naturels, les modèles spatiaux stochastiques peuvent générer des modèles spatiaux plus réalistes qui incluent des événements inattendus. Par exemple, de nombreux modèles d'occupation et d'utilisation des sols comprennent des composantes stochastiques pour modéliser les probabilités de transition entre différents types de couverture des sols (Qiang & Lam, 2015).

➤ Modèle cartographique

Ces modèles sont construits en utilisant un ensemble coordonné d'outils d'analyse pour résoudre un problème spatial. La majorité de ces modèles sont statiques dans le temps car ils incluent des variables spatiales à un point fixe (Tomlin, 2017). La figure 5 est un exemple de modèle cartographique qui permet de trouver des sites appropriés pour une nouvelle école. C'est pourquoi cette catégorie de modèles sont aussi appelés des modèles de convenance ou d'adéquation.

Ces modèles se basent généralement sur l'utilisation des automates cellulaires (AC) constitués d'outils d'analyse matricielle. Présentement, l'application des AC a permis de modéliser des processus géographiques tels que le changement de la couverture terrestre, la croissance urbaine et l'expansion des espèces envahissantes. Ces modèles sont le plus souvent développés en utilisant le script Python ou ArcGIS Model Builder (Tomlin, 2017).

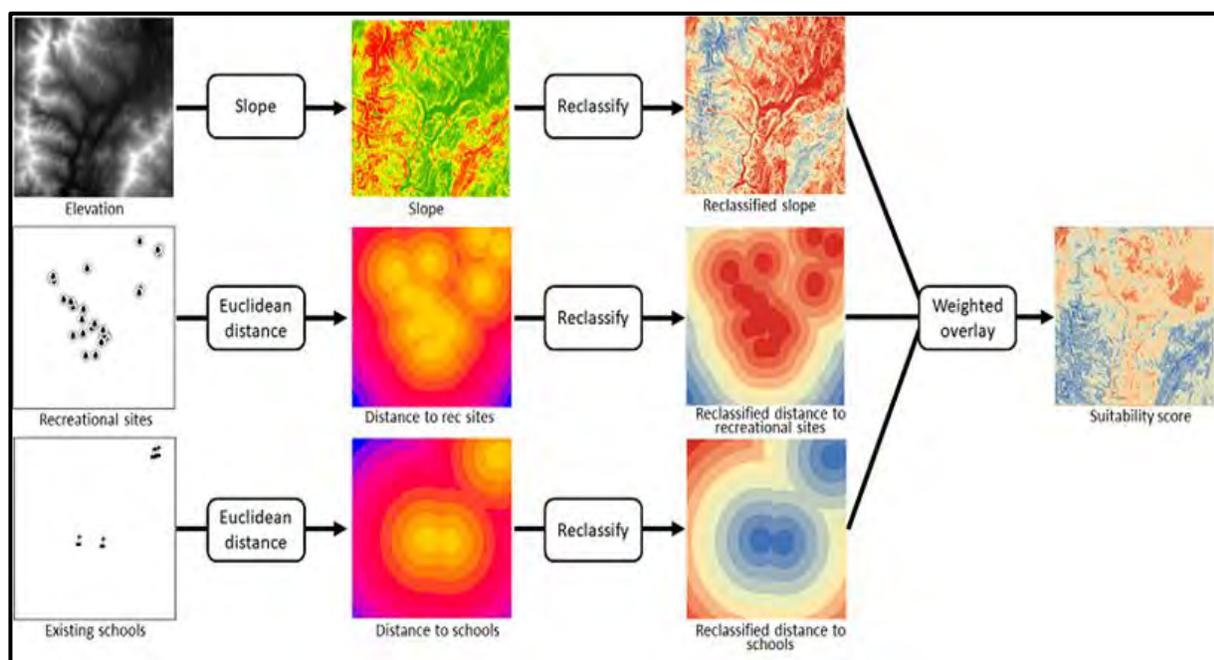


Figure 5 : Modèle graphique d'adéquation (Tomlin, 2017)

2.2 Travaux antérieurs avec le logiciel ArcGIS et la modélisation spatiale dans le domaine minier

Dans le domaine minier, l'exploitation des gisements nécessite une cartographie locale détaillée dont la mise à jour est continue pendant tout le processus d'extraction. Le logiciel ArcGIS, et la modélisation spatiale sont utilisés aussi pendant les étapes de prospection et d'études de préfaisabilité et faisabilité. En 2021, Toubri et collaborateurs ont travaillé sur une modélisation spatiale à trois dimension (3D). L'objectif général de cette étude était de visualiser la distribution des éléments dangereux (arsenic principalement) dans le gisement de minerai et la roche mère (Toubri et al. 2021). Grâce au processus stochastique et à l'enregistrement géologique des carottes de forages, le modèle spatial 3D de la teneur en arsenic a été créé. Les résultats obtenus ont montré un composé géochimique d'arsenic s'étendant jusqu'à 500 m du gisement d'or, avec jusqu'à 94 % des teneurs en arsenic dépassant 50 ppm. Pour les gestionnaires miniers, cette étude servira d'outil de gestion proactive des déchets miniers pendant la phase de décapage. Par ailleurs, les outils de la modélisation spatiale sont souvent utilisés dans plusieurs autres travaux (voir le tableau 1).

Récemment, la modélisation du changement du sol a été appliquée pour analyser le couplage entre la nature et l'homme à l'aide de diverses techniques de SIG et de modélisation spatiale. Les phénomènes d'occupations du sol qui combinent généralement les facteurs humains et naturels impliquent des relations non linéaires. Les techniques SIG et la modélisation spatiale ont permis de mettre en évidence des résultats intéressants et prometteurs (Brown et al., 2005). En effet, pendant les travaux effectués par (Morten et al., 2013), les chercheurs ont utilisé des données spatiales à différentes échelles couplées aux données socio-économiques. Ces travaux ont permis d'explorer et de tester la compréhension des relations entre les différents scénarios de changements d'utilisation des sols. A l'aide du modèle d'automate cellulaire, différents scénarios de changement des sols à l'horizon 2040 ont été élaborés puis traduits en stratégies d'aménagement du territoire. Une autre étude réalisée par (Haque & Basak, 2017) au Bangladesh, a concerné les changements d'occupation du sol à l'aide de techniques de SIG et de télédétection. A travers cette étude spatio-temporelle, les auteurs ont utilisé des données satellitaires anciennes et récentes pour évaluer les changements typiques du paysage au cours des décennies. Les résultats de cette étude ont démontré qu'environ 40 % des zones humides naturelles de la zone d'étude a été convertie en terre agricole sur une période de 30 ans.

En foresterie, les travaux réalisés par (Singh et al., 2017) ont évalué la dynamique spatiale de la déforestation et de la fragmentation de la forêt dans l'Assam, en Inde. Les paramètres comme l'altitude, la pente, la distance aux plans d'eau et la distance aux routes ont été déterminants dans cette étude. Les résultats ont indiqué une diminution des forêts centrales tout au long de la période d'étude. La base de données spatiales générée dans le cadre de l'étude a été utile pour comprendre l'impact de la déforestation et de la fragmentation sur la biodiversité et le changement d'affectation des terres (Singh et al., 2017).

En hydrologie, plusieurs études ont été réalisées en utilisant les SIG par Nadeau et collaborateurs. En 2015 dans la région de l'Abitibi Témiscaminque par exemple, les travaux réalisés ont permis de développer des stratégies de mise en valeur des aquifères granulaires se trouvant dans les eskers (Nadeau, Simon et al., 2015). Les auteurs ont appliqué une méthodologie basée sur l'utilisation de SIG dans lequel un indice de sensibilité des ressources en eau souterraine a été défini et les ressources en eau souterraine ont été évaluées. En 2021, dans la région de la Baie de James, les auteurs ont travaillé sur deux approches de modélisation basées sur les SIG pour évaluer les ressources en eau souterraine associées aux aquifères granulaires (Nadeau, S et al., 2021). Les résultats obtenus via les analyses multicritères (AMC) et calculs géométriques du SIG ont estimé que le volume total d'eau souterraine stockée dans les aquifères granulaires non confinés atteint environ 40 km³.

Plusieurs auteurs ont utilisé la modélisation et le SIG pour étudier les aires de répartition des espèces animales. Glenz et al, (2001) ont travaillé sur la répartition méridionale de la population de loups d'Europe en Italie. Sur la base des variables telles que la zone urbaine, la densité de population humaine, les terres arables, l'altitude minimale et les variables d'habitat du loup, les auteurs ont utilisé le modèle stochastique qui implique la régression logistique afin de vérifier l'adéquation de l'habitat du loup. Présentement, il existe encore de nombreux problèmes techniques et d'application pour l'utilisation de la modélisation, notamment des interactions entre les systèmes naturels et humains. Ces problèmes concernent essentiellement des questions sur la sélection des variables (vue la pluralité et la complexité des concepts), les techniques de modélisation (laquelle est mieux adaptée dans telle ou telle étude) et aussi l'utilité des résultats (Crooks et al., 2008). Par ailleurs, plusieurs études continuent d'utiliser les SIG et la modélisation pour la réalisation des travaux de recherche. Le tableau 1 présente un sommaire de quelques études à titre représentatif.

Tableau 1 : Récapitulatif de quelques travaux antérieurs avec SIG et la modélisation spatiale.

Travaux	Exemples de travaux réalisés	Références
Géologie et mine	Modélisation 3D, distribution arsenic	(Toubri et al., 2021)
Expansion Urbaine et Occupation du sol	Modélisation, urbanisation, sols.	(Morten et al., 2013)
	Modélisation, agents de la dynamique, scénarios futurs.	(Murray-Rust et al., 2013)
	Changement, couverture terrestre, Grand Dhaka.	(Dewan & Yamaguchi, 2009)
	SIG, télédétection, Bangladesh.	(Haque & Basak, 2017)
Déforestation	Dynamique, couverture terrestre, régions tropicales.	(Lambin et al., 2003)
	Modélisation, évaluation, perte de biodiversité, forêt tropicale.	(Pérez-Vega et al., 2012)
	Modélisation, déforestation, réseau neuronal multicouche.	(Singh et al., 2017)
Services écosystémiques	Modélisation, agroécosystèmes	(Wieland et al., 2013)
Hydrogéologie	SIG, modélisation, eaux souterraines, les eskers et extraction du sable.	Nadeau et al., 2015, 2017 et 2021
Habitat de la faune	Prédiction, habitat du loup	(Glenz et al., 2001)
	Habitat, loup gris, forêt boréale aménagée.	(Houle, 2008)

2.3 Études antérieures réalisées sur les impacts hors site des mines en Abitibi et au nord du Québec

2.3.1 Aperçu général

Dans le cadre des études sur les impacts hors site des opérations minières sur les communautés végétales, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés dans les régions de l'Abitibi et du Nord du Québec. Les travaux de recherche se sont déroulés sur des sites miniers à différents stades du cycle de vie, soit trois en opération (Canadian Malartic, LaRonde, Casa Berardi), deux fermés (Lapa, Joutel) et un en projet (Akasaba). Les effets hors site des mines sur la communauté végétale du sous-bois ont été évalués grâce aux plantes vasculaires (ligneuses et herbacées) (Yin et al., 2023), aux bryophytes et aux lichens (Yin et al., 2022).

La méthodologie a consisté à la mise en place d'un plan d'échantillonnage de six à huit transects établis perpendiculairement à la frontière des infrastructures minières de chaque site. Des parcelles ont été placées le long de chaque transect, à différentes distances à partir des abords des infrastructures minières (0, 20, 50, 100, 200, 500 et 1000 m) et trois quadrats de 1 m² ont été placés au hasard dans chaque parcelle. La présence ou l'absence de chaque espèce a été enregistrée dans chaque parcelle de 3 m de rayon. Une présence dans l'une de ces parcelles a été considérée comme un événement de fréquence. Une analyse statistique a été utilisée pour déterminer la fréquence et l'abondance de chaque espèce. Différents types d'écosystèmes (forêts de conifères, forêts mixtes, forêts de feuillus et zones humides) se trouvant tout autour des sites ont été pris en compte.

Les résultats obtenus sur les effets hors site des opérations minières sur la structure des bryophytes (Yin et al., 2022 et 2023 b) et sur la quantification des effets (empreinte des opérations minières) sur les communautés végétales du sous-bois (Yin et al., 2023) ont démontré que les impacts hors site des opérations minière pouvaient s'étendre sur une distance de 200 m à partir des abords des concessions minières. Par ailleurs, sur la fréquence et l'abondance des mousses à plumes de la forêt boréale, la distance pouvait atteindre un kilomètre, à proximité des mines en exploitation.

2.3.2 Description des écosystèmes échantillonnés autour de chaque site minier

La forêt boréale qui occupe une place centrale dans le paysage forestier de la région abitibienne et du Nord du Québec est constituée de différents types d'écosystèmes forestiers. La caractérisation de cette forêt est basée essentiellement sur la classification des arbres qui la composent. Dans le cadre des études réalisées par (Yin et al., 2022), plusieurs types d'écosystèmes ont été échantillonnés pour délimiter la distance impactée par les activités minière dans la région. Il s'agit principalement des forêts de conifères (résineux), les forêts d'arbres à feuilles caduques (feuillus), des forêts mélangées (résineux + feuillus encore appelées forêts mixtes) et des zones humides. Les mines qui sont à l'étude dans cette recherche se trouvent toutes dans ces types d'écosystèmes mais dont la répartition est différente selon les sites. La figure 6 présente la répartition des écosystèmes échantillonnés autour de chaque site minier.

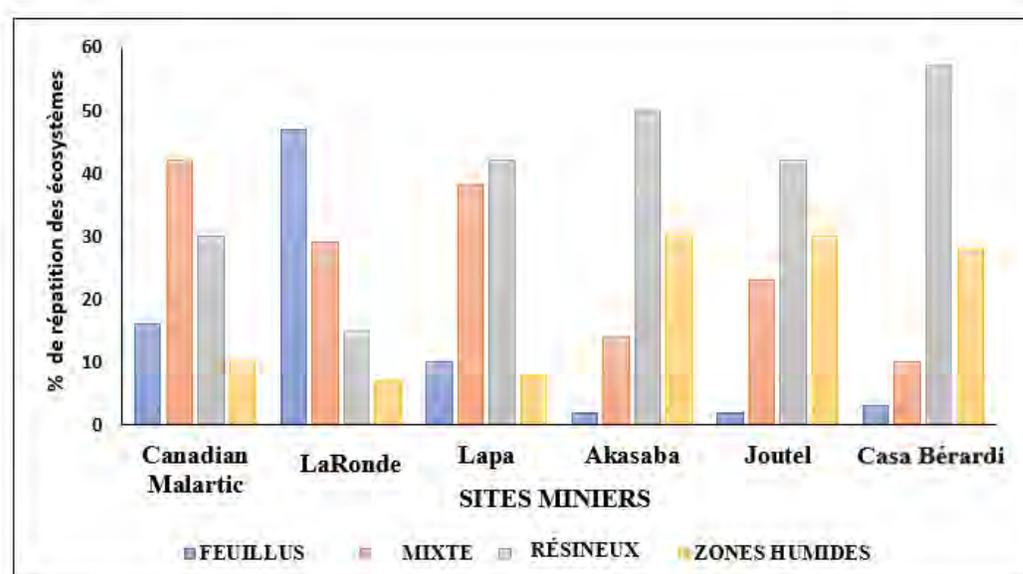


Figure 6 : Pourcentage de répartition des écosystèmes forestiers échantillonnés autour de chaque site minier.

Les écosystèmes identifiés sont définis comme suit :

- **La forêt des feuillus :** est un type d'écosystème forestier dont la caractéristique principale est sa formation de plus de 75 % des arbres qui possèdent des feuilles caduques, qui tombent avant l'hiver. Dans cet écosystème, on trouve généralement des espèces végétales comme : le peuplier faux-tremble, le peuplier baumier, le bouleau à papier, les saules, l'aulne rugueux et l'aulne crispé.

- **La forêt des résineux** : est la plus répandue des types d'écosystèmes forestiers au Canada. Elle est composée essentiellement par des arbres qui possèdent des feuilles pérennes, qui persistent dans l'arbre toute l'année (conifères). Cette catégorie d'écosystème forestier abrite en majorité l'épinette blanche, l'épinette noire, le sapin baumier, le pin gris et le mélèze laricin.
- **La forêt mixte** : cette catégorie de forêt compte des feuillus et des résineux et chacun de ces types représentent entre 26 et 75 % des arbres qui la constitue (Ministère des forêts de la faune et des parcs, 2004).
- **Les zones humides** : Un milieu humide ou zone humide est définie dans la littérature comme étant un terrain où la nappe phréatique est à proximité ou au-dessus de la surface. Ils peuvent aussi être des zones saturées d'eau assez longtemps pour créer des conditions comme des sols modifiés par l'eau et une végétation hydrophile (Breton et al., 2005). Les zones humides couvrent 30% de la forêt boréale et offrent un lieu favorable pour l'habitat de plusieurs espèces fauniques et floristiques (Breton et al., 2005).

2.3.3 Principales conclusions des travaux et les besoins en recherche

Les impacts hors site des opérations minières sont peu connus et souvent, ils sont négligés pendant les évaluations environnementales des projets en général et plus particulièrement les projets miniers. Cependant, ces impacts peuvent créer des changements globaux importants dans le paysage forestier à proximité des sites miniers. D'une façon générale, ces changements modifient la distribution des espèces végétales du sous-bois de la forêt boréale. En effet, les travaux de (Yin et al., 2022), ont établi la preuve que la biodiversité boréale tels que les bryophytes et les lichens pourraient être menacés par les impacts hors site des opérations minières. Les auteurs ont constaté que les effets des impacts sont remarquables au-delà des limites du site minier. Les résultats trouvés ont permis de délimiter la zone d'influence hors site des opérations minières sur la communauté végétale du sous- bois de la forêt boréale à proximité des sites miniers. Selon les conclusions des travaux de recherche, les effets des impacts hors site peuvent s'étendre sur une distance de 200 m à partir des abords des infrastructures minières. En revanche, peu d'informations existent encore sur l'effet des perturbations au niveau de la végétation arborée autour des sites miniers. Cette étude va alors fournir des réponses, quant aux observations spatialement explicites des perturbations du paysage forestier autour des sites miniers dans les régions de l'Abitibi Témiscaminque et du Nord du Québec.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 La zone d'étude

Les six sites miniers qui ont fait l'objet de cette étude se trouvent dans les régions de l'Abitibi-Témiscaminque (LaRonde, la Mine Canadian Malartic, Lapa et Akasaba) et celle de la Baie James (Casa Berardi et Joutel). La région de l'Abitibi Témiscaminque se situe à l'ouest et celle de la Baie James se trouve au nord dans la province du Québec au Canada. La figure 7 présente la zone d'étude.

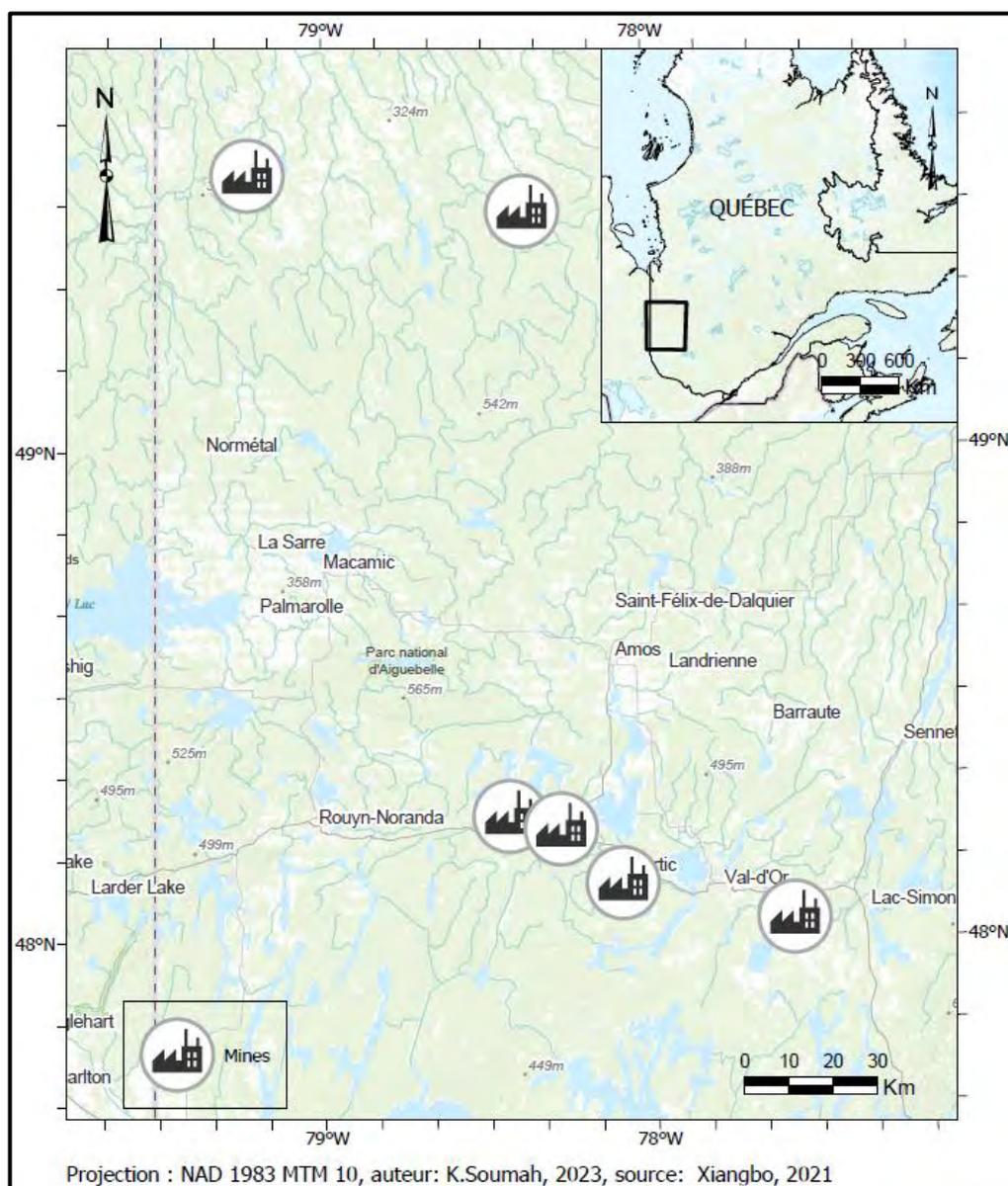


Figure 7 : Carte de la zone d'étude

Cette zone est caractérisée par un climat continental froid et humide, pendant l'hiver les températures varient entre -14 et -10 degrés Celsius et pendant l'été elles se trouvent entre 16 et 18 degrés Celsius. Annuellement, les précipitations moyennes varient de 790 mm à plus de 1 300 mm (Wang et al., 2013). Les principaux types de sols sont les luvisols gris qui proviennent des dépôts argileux (Vincent & Hardy, 1997).

La zone d'étude se situe entre les domaines bioclimatiques du sapin, bouleau blanc et bouleau jaune au sud, le paysage forestier est dominé principalement par les forêts mixtes composées du sapin baumier, l'épinette blanche et du bouleau blanc. La partie nord de la zone dans laquelle sont localisées deux mines, se situe à environ 49°30' de latitude et se trouve dans le domaine de la pressière à mousses où l'épinette noire prédomine (Saucier et al., 1998). Quatre mines se trouvent beaucoup plus au sud de la zone et se situe à environ 48° 8' de latitude. Les deux blocs se trouvent à environ 150 km à vol d'oiseau.

3.2 Description des sites miniers mis à l'étude

Six mines ont été l'objet de cette étude à savoir :

➤ La mine Akasaba est un projet minier en développement, appartenant à la compagnie minière Mines Agnico Eagle (AEM). Ce projet sera une mine à ciel ouvert sur le territoire de la ville de Val d'Or (48°3'12"N ; 77°32'8"W), où sera extrait le minerai de cuivre et d'or à raison de 3 000 à 4 000 t/jour. Le minerai sera traité à l'usine de Goldex situé à 30 kilomètres du projet minier.

La durée de vie de cette mine est de 4 à 6 ans selon les scénarios. Les infrastructures minières comprendront essentiellement une fosse de minage qui mesurera 500 m de longueur, 350 à 450 m de largeur et une profondeur de 145 à 190 m, cinq haldes qui seront composés de la halde de minerais à haute teneur, la halde de minerais basse teneur, une halde à stérile non génératrice d'acidité, une halde à stérile potentiellement génératrice d'acidité et une halde de mort terrain (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014) . La figure 8 montre une vue aérienne du projet minier et la figure 9 montre des infrastructures prévues à la mine Akasaba.



Figure 8 : Vue aérienne du projet Akasaba sur image Google Earth (2024).

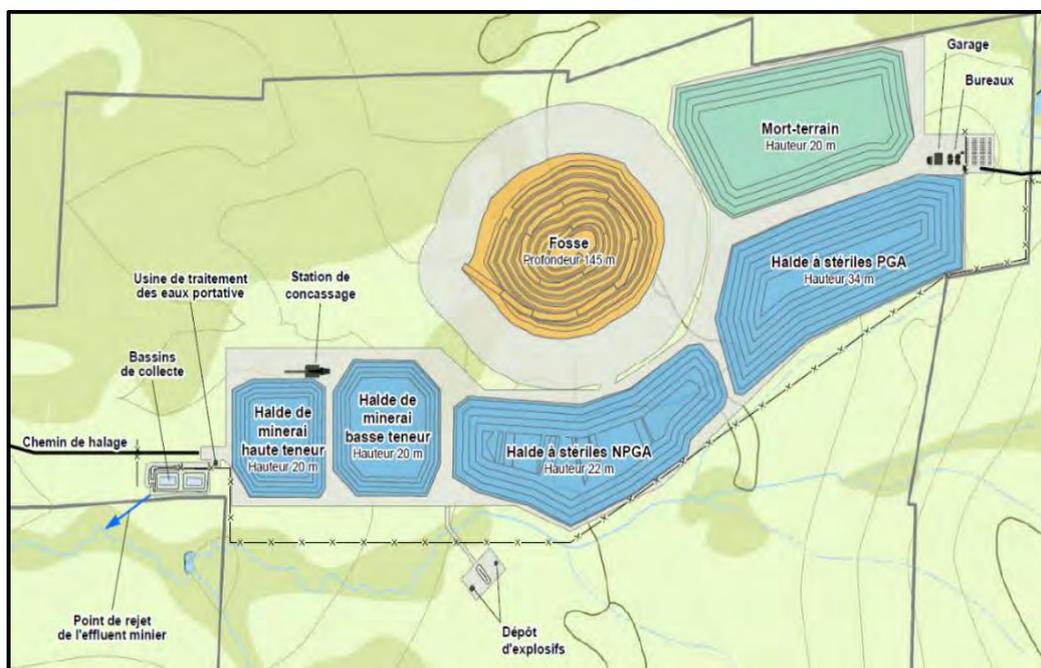


Figure 9 : Vue d'ensemble des installations minières prévues à Akasaba (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014).

➤ La mine Casa Berardi se trouve au nord de la ville de la Sarre ($49^{\circ}33'43''\text{N}$; $79^{\circ}14'8''\text{W}$) dans la municipalité de la Baie James. C'est une mine à opération mixte (souterraine et à ciel ouvert) qui est active (par intermittence) depuis 1935. La mine d'or et d'argent de Casa Berardi est exploitée par la compagnie minière Hecla Québec. La figure 10 montre une vue aérienne du site minier.



Figure 10 : Vue aérienne du site de Casa Berardi sur image Google Earth (2024).

Depuis le début des travaux d'exploitation en 1988, la mine a produit plus de 2,1 millions onces d'or, et en 2018, des travaux d'extension ont été effectués pour augmenter la durée de vie de la mine jusqu'en 2035 (Archambault-Giroux et al., 2019). La Figure 11 montre une vue d'ensemble des infrastructures minières de surface sur le site minier de Casa Berardi.

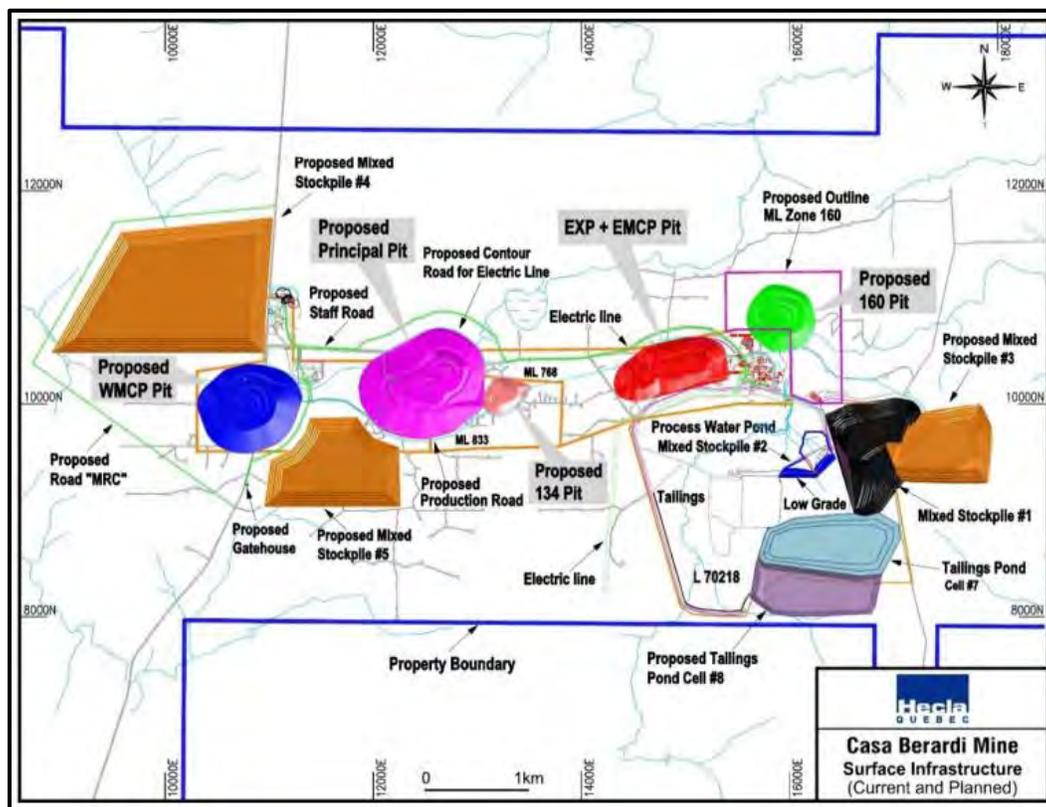


Figure 11 : Vue d'ensemble des infrastructures minières de surface sur le site minier de Casa Beradi (Archambault-Giroux et al., 2019) .

Dans le rapport technique publié en 2019 par Archambault Giroux et collaborateurs, la partie est de la mine comporte les infrastructures suivantes : une usine de traitement du minerai, un parc à résidus composés de quatre compartiments, un bassin de polissage, un bassin de sédimentation et un bassin de traitement des eaux, un bâtiment administratif, une station de pompage d'eau, un chevalement et un puits de 380 m de profondeur (sans treuil), une rampe d'accès à la mine, une halde de roches minéralisées, une halde de roches stériles, et une halde de mort terrain.

Quant à la partie ouest de la mine, les infrastructures minières sont composées d'une usine de remblayage en pâte, un bassin de décantation, une station de pompage, un bâtiment composé de garage et des bureaux, un entrepôt, une rampe permettant d'accéder à la mine Ouest et à la zone principale, un chevalement et puits de mine, une cimenterie avec une ligne d'alimentation en résidus depuis l'usine et des trous de distribution vers le souterrain, une halde de roches stériles et enfin une halde de roches minéralisés.

➤ La mine Canadian Malartic est une mine à ciel ouvert en activité, située à proximité de la ville de Malartic (48°7'21"N; 78°5'23"W). La figure 12 montre une vue aérienne du site minier de Canadian Malartic.



Figure 12 : Vue aérienne du site minier de Canadian Malartic sur image Google Earth (2024).

Le site a été exploité en différentes phases à travers les années depuis 1934. L'opération en cours a été démarrée en 2014 et actuellement, cette mine est l'une des plus grandes mines d'or au Canada avec une production moyenne de l'ordre de 57 000 tonnes de minerai par jour, soit environ 20 Mt par année (Arseneault et al., 2021). Les installations de cette mine comprennent un parc à résidus, des bassins de polissage des eaux minières, deux fosses de minage, les haldes à stériles, comme le montre la figure 13.



Figure 13 : Vue d'ensemble des infrastructures minières de Canadian Malartic, (Arseneault et al., 2021). A= Zone de concassage, B= Zone d'entreposage du minerais, C=Usine de traitement du minerais, D=Parc a résidus, E=Bureaux et garage, F= Fosse Canadian Malartic, G=Fosse barnat, H=Halde stérile.

➤ La mine LaRonde est un complexe minier situé à environ 40 km de la ville de Rouyn Noranda ($48^{\circ}15'14''N$; $78^{\circ}25'59''W$). La figure 14 montre une vue aérienne du site. LaRonde est une mine active détenue et exploitée par Agnico Eagle Mines (AEM, Canada). Cette mine souterraine est en opération depuis 1988 et produit des concentrés de cuivre, de zinc, des lingots d'or et d'argent. Les installations minières de surface comprennent l'usine de concentration, les bureaux, le parc a résidus, l'usine de traitement de l'eau, les bassins de polissage, les haldes à stériles, comme le montre la figure 15.



Figure 14 : Vue aérienne du site minier LaRonde sur image Google Earth (2024).



Figure 15 : Vue d'ensemble des infrastructures minières de LaRonde, (Agnico Eagle Ltée, 2023)

A= Puits Penna, et bureaux ; B= parc à résidus et bassins de polissage; C=Usine de concentration; D= Usine de remblais en pâte et garage d'équipement mobile.

➤ La mine Lapa est située à 11 kilomètres à l'est du complexe minier de LaRonde en Abitibi-Témiscamingue ($48^{\circ}13'45''N; 78^{\circ}17'1''W$), Lapa a été une mine souterraine de la compagnie Agnico Eagle. La mine d'or de Lapa a connu deux périodes d'exploitation, d'abord de 1938 à 1943 et ensuite de 2009 à 2018. Pendant environ dix ans d'opération, la mine Lapa a généré plus de 872 000 onces d'or. Les installations de LaRonde ont été utilisées pour le traitement du minerai et actuellement la mine est en phase de restauration et de fermeture (Saint-Pierre & Wigorski, 2009). La figure 16 montre une vue aérienne du site.



Figure 16 : Vue aérienne du site Lapa sur image Google Earth (2024).

➤ La mine Joutel est un site localisé à environ 100 km au nord de la ville d'Amos ($49^{\circ}29'28''N; 78^{\circ}21'8''W$). Ce site minier est partiellement restauré et fermé depuis 1998, quelques travaux de surveillance de la qualité du site sont encore effectués (Lewis & Gallinger, 2006). Depuis le début de son exploitation, cette mine a produit du cuivre, de l'or et de l'argent avec essentiellement les mines Agnico Eagle (1974 à 1993) (Goldex Mining, 2001). La restauration de ce site a débuté en 1996. Les infrastructures de l'ancienne mine comprenaient des bassins de polissage, un parc résidus, une fosse de minage. Des travaux de restauration de ce site concernaient

principalement la réhabilitation du parc à résidus qui couvrait 74 hectares. La figure 17 montre une vue aérienne du site.



Figure 17 : Vue aérienne du site Joutel sur image Google Earth (2024).

3.2 Méthodes

3.2.1 Caractérisation du paysage forestier à proximité de chaque site minier.

Pour évaluer l'ampleur des impacts des infrastructures minières sur les écosystèmes forestiers, nous avons caractérisé le paysage forestier à l'extérieur des sites miniers en utilisant les outils d'analyse du logiciel ArcGIS et en analysant la répartition spatiale des attributs des écosystèmes forestiers. Cette caractérisation a été réalisée en utilisant la base de données de la carte écoforestière et avec la fonction « buffer » du logiciel ArcGIS pro (version 3.0.1). Des anneaux de 10 m incrémentale

ont été créés à partir des abords des infrastructures minières jusqu'à 250 m au pourtour de chaque site minier. Au total, un nombre de vingt-cinq anneaux ont été créés pour chaque site minier

La figure 18 montre un schéma simplifié de la démarche avec le site minier de Canadian Malartic à titre d'exemple.

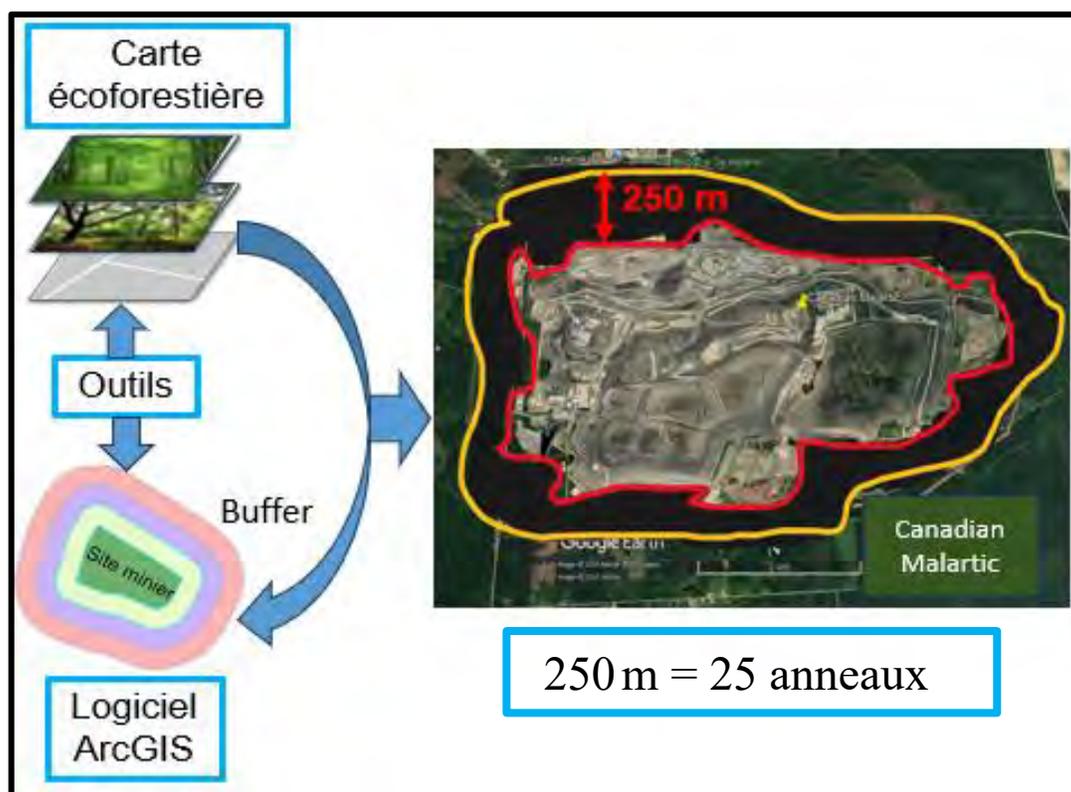


Figure 18 : Schéma simplifié de la démarche utilisée

La distance euclidienne de 250 m a été considérée comme la zone d'influence hors site des activités minières à partir des abords des installations grâce aux travaux de (Yin et al., 2022). Pour chaque anneau de 10 m de la zone tampon, les données écoforestières (5^e inventaire écoforestier du ministère des Ressources naturelles et des forêts) ont été intersectées. Ensuite les attributs (types de couverture forestières, classe d'âge des forêts et types de terrain) ont été calculés et exprimés en pourcentage pour chaque superficie (anneau de 10 m) et ce jusqu'à la distance de 250 m. Les zones 1 à 25 représentent les subdivisions de 10 m couvrant les 250 m à partir de la limite du site minier, 1 étant le plus près du site et 25 le plus éloigné.

Pour chacune des zones présentes sur les figures du chapitre 4, le total de la distribution des variables n'est pas de 100% puisque d'autres catégories de variables ne faisant pas partie de celles

analysées comblent la différence jusqu'à 100%. Par exemple dans l'analyse de la catégorie des terrains forestiers (résineux, mixtes et feuillus), le pourcentage des « NULL » représente ceux des terrains non forestiers formés par des étendues d'eau, des terrains anthropiques, des routes, etc. Pour éviter de surcharger les figures et faciliter la compréhension, il a été choisi pour chaque cas de montrer seulement les variables retenues. Cependant, compte tenu de la pluralité des variables qui composent la classe des types de terrains (CO-TER) et que pour la majorité, les pourcentages sont négligeables, uniquement les résultats pour les deux variables retenues dans cette étude sont présentés, à savoir les terrains anthropisés (ANT) et les terrains dénudés humides (DH).

3.2.2.1 Les données écoforestières pour l'Abitibi : codes et paysages

Les données écoforestières d'une région sont l'ensemble des informations des écosystèmes forestiers regroupées sur une carte. La carte écoforestière est le résultat d'inventaire constituée de plusieurs groupements de données écoforestière (Gouvernement du Québec, 2023). Elle contient des informations détaillées sur les peuplements forestiers à savoir : les types de couvertures forestières, les groupements d'essences, l'origine, la densité et la hauteur des peuplements, les perturbations, les classes d'âge des plantes, les classes de pente, les dépôts de surface, les classes de drainage (Ministère des forêts de la faune et des parcs, 2004).

La carte écoforestière du Québec méridional provient de l'interprétation des photographies aériennes et des points de contrôle sur le terrain dans le cadre de l'inventaire réalisé par le ministère des ressources naturelles et de la Forêt (MRNF) afin de gérer le patrimoine forestier. Cette cartographie correspond au portrait de la forêt jusqu'à l'année de la prise de photographie aérienne sur un cycle de cartographie d'environ 10 ans (Ministère des forêts de la faune et des parcs, 2004). La carte écoforestière utilisée dans cette étude est issue du cinquième cycle de cartographie amorcé depuis 2015, dans laquelle sont intégrées les contours et la nature des perturbations récentes (interventions forestières, feux et autres perturbations) de l'année 2022. Selon les informations fournies par le Ministère des forêts de la faune et des parcs (2004), cette cartographie couvre la quasi-totalité du territoire au sud du 52e parallèle de la forêt publique et privée du Québec. Elle est diffusée par feuillet cartographique à l'échelle de 1/250 000. L'aire minimale de cartographie est de 4 ha pour les peuplements et 0,1 ha pour les perturbations.

Dans le tableau 2 se trouve un résumé récapitulatif des codes et leurs descriptions sur la base des documents fournis par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Ministère des forêts de la

faune et des parcs, 2015). Trois variables ont été choisies dans le cadre de ce projet, il s'agit des types de couvertures forestières, de l'âge des forêts et les types de terrains. Ces trois variables sont décrites plus en détails dans les sections suivantes.

Tableau 2 : Codes des cartes écoforestières et leurs descriptions (tiré du dictionnaire de la carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023).

CODES	DESCRIPTION
TYPE_COUV	Type de couverture forestière
GR_ESS	Groupement d'essences
PART_STR	Particularité du peuplement
CL_DENS	Classe de densité
ORIGINE	Perturbation ou intervention d'origine
CL_HAUT	Classe de hauteur
AN_ORIGINE	Année de perturbation ou d'intervention d'origine
CL_AGE	Classe d'âge
AN_PERTURB	Année de la perturbation partielle ou de l'intervention partielle
CL_PENT	Classe de pente
DEP_SUR	Dépôt de surface
CL_DRAI	Classe de drainage
TYPE_ECO	Type écologique
CO_TER	Code de terrain

1- TYPE DE COUVERTURES FORESTIÈRES

Cette variable désigne les grands types de couvertures forestières du paysage d'une région donnée. Dans cette catégorie de variable, on distingue trois grands groupes à savoir, le feuillus (F), le résineux (R) et les forêts mélangé (mixte) (M). La figure 19 présente le schéma simplifié pour la détermination du type de couvert des écosystèmes forestiers. Ce travail est effectué par le ministère chargé des forêts.

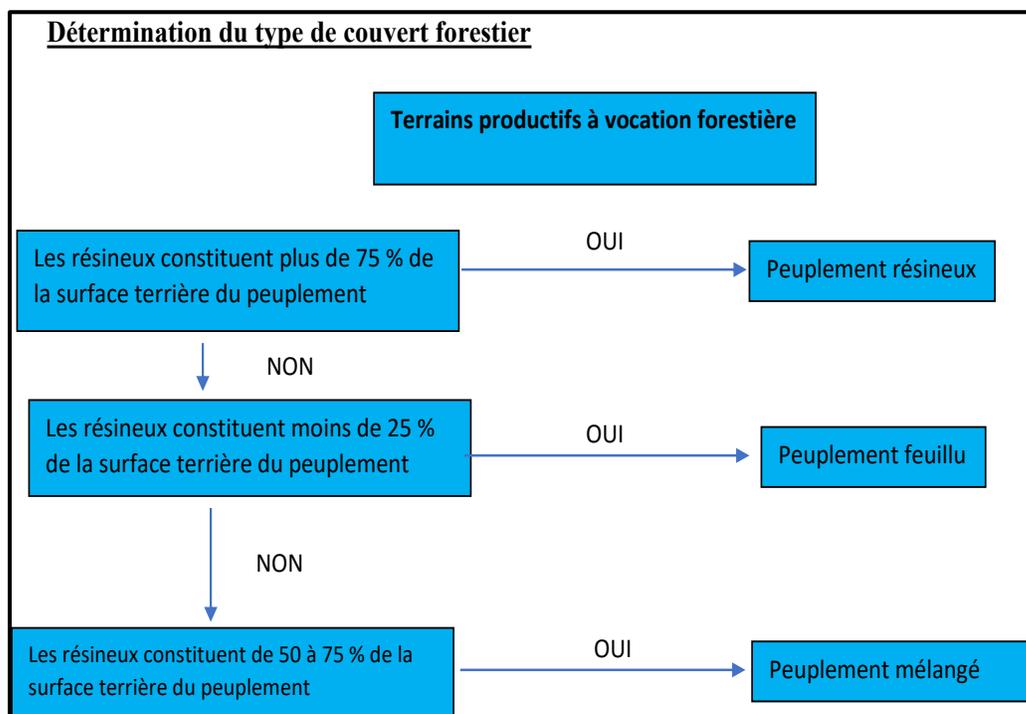


Figure 19 :Schéma simplifié pour déterminer les types de couvertures forestière (tiré du Ministère des forêts de la faune et des parcs, 2015).

2- CLASSE D'ÂGE DES FORÊTS

La variable « classe d'âge » fourni des renseignements à la fois sur la structure du peuplement et sur l'âge des tiges qui composent le peuplement forestier. Les structures régulières, irrégulières ou étagées du peuplement aident à déterminer si les tiges qui composent le peuplement sont dans la même classe d'âge, ces peuplements sont alors appelés équiens ou dans des classes d'âge différentes appelés inéquiens (Ministère des forêts de la faune et des parcs, 2015). Les tiges sélectionnées dans l'estimation de l'âge d'un peuplement de structure régulière ou irrégulière sont fonction de la classe de hauteur du peuplement: 7 m et plus de hauteur: tiges dominantes et codominantes; moins de 7 m de hauteur: tiges qui forment le peuplement d'avenir. Dans la catégorie des classes d'âge figurent

plusieurs codes, le tableau 3 donne un aperçu général sur quelques codes et leurs descriptions. Pour plus d'informations, voir le dictionnaire Carte-éco disponible sur le site du ministère des forêts.

Tableau 3: Codes et leurs descriptions de la classe d'âge des peuplements forestiers (tiré du dictionnaire carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023).

Codes	Description
Lettre seulement	JIN Jeune peuplement inéquien
	JIR Jeune peuplement irrégulier dont l'origine remonte à moins de 80 ans
	VIN Vieux peuplement inéquien
	VIR Vieux peuplement irrégulier dont l'origine remonte à plus de 80 ans
	JINJI Peuplement étagé : Jeune peuplement équienne et jeune peuplement équienne
	JINVI Peuplement biétagé : Jeune peuplement inéquien et vieux peuplement inéquien
	VINJI Peuplement étagé : Vieux peuplement équienne et jeune peuplement équien
	VINVI Peuplement biétagé : Vieux peuplement inéquien et vieux peuplement inéquien
Chiffres seulement	10 Peuplement équienne : classe d'âge de 10 ans
	1030 Peuplement étagé : classes d'âge de 10 ans et 30 ans
	10120 Peuplement étagé : classes d'âge de 10 ans et 120 ans
	12070 Peuplement étagé : classes d'âge de 120 ans et 70 ans
Lettre + chiffres	JIN10 Peuplement étagé : Jeune peuplement inéquien et 10 ans
	VIN10 Peuplement étagé : Vieux peuplement inéquien et 10 ans
Chiffres + lettres	10JIN Peuplement biétagé : Classes d'âge de 10 ans et jeune peuplement inéquien
	10VIN Peuplement biétagé : Classes d'âge de 10 ans et vieux peuplement inéquien
	120JI Peuplement étagé : Classe d'âge de 120 ans et jeune peuplement inéquien
	120VI Peuplement étagé : Classe d'âge de 120 ans et vieux peuplement inéquien
	10JIN Peuplement étagé : Classe d'âge de 10 ans et jeune peuplement inéquien
	12VIN Peuplement étagé : Classe d'âge de 120 ans et vieux peuplement inéquien

3- CODE TERRAIN

Cette variable se définit comme étant les catégories de terrain autres que les terrains forestiers productifs. Dans ce groupe de variable, on retrouve des étendues d'eau, les terrains à vocation non forestière et les terrains forestiers improductifs. Voir le tableau 4 pour les détails sur les codes principalement observés dans cette étude, la liste complète se trouve en annexe.

Tableau 4 : Codes et leurs descriptions de la classe codes de terrain (tiré du dictionnaire de la carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023)

Codes	Description
AL	Aulnaie
ANT	Anthropique (terrain non boisé)
DH	Dénudé humide
EAU	Étendue d'eau
INO	Site inondé, site exondé non régénéré
DS	Dénudé Sec
LTE	Ligne de transport d'électricité
RO	Route et autoroute (emprise)
ILE	Ile de superficie inférieure à 1 ha
GR	Gravière

Dans la littérature trouvée, plusieurs auteurs ont mentionné les effets possibles des opérations minières sur la végétation autour des sites miniers. Ces effets pourraient être entre autres : les poussières qui affecteraient les processus de photosynthèse (Ghose & Majee, 1998) et les concentrations anormales des métaux dans le sol qui causeraient la mortalité des plantes (Nascimento & William, 2004).

Dans le cadre de la présente étude, six variables ont fait l'objet de notre analyse. Ces variables choisies sont en lien directement avec les attributs de la végétation arborée et le types de terrains.

Ce choix se justifie par le fait que ces attributs représentent les différentes caractéristiques forestières et écologiques du territoire et forment le portrait de la forêt. Étant donné que notre recherche se base sur la caractérisation de la végétation autour des sites miniers, ces attributs constituent des critères de choix quant aux informations liées aux paysages forestiers. La figure 20 présente les jeux de données utilisés dans ces travaux de recherche

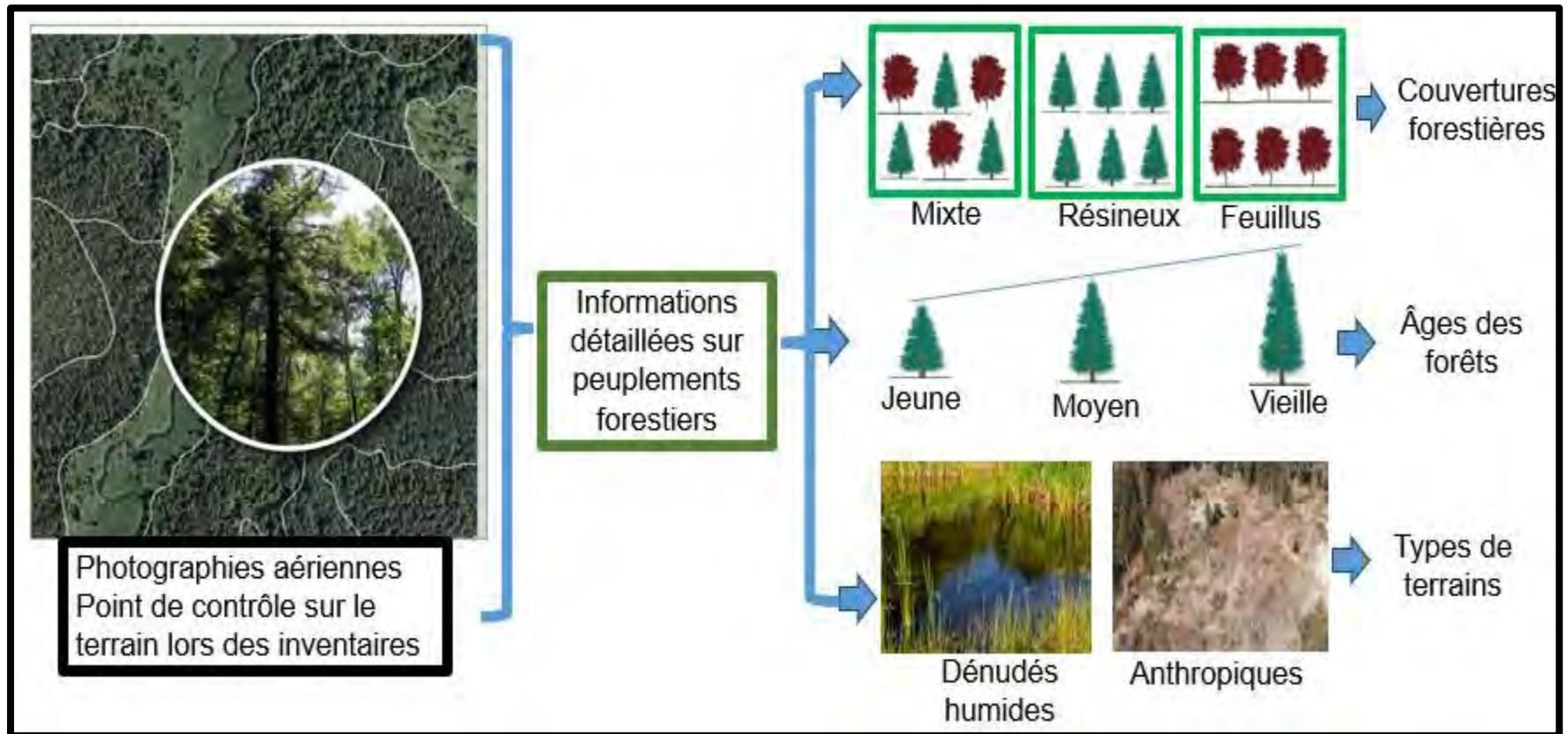


Figure 20 : Les attributs du paysage forestier utilisés dans la présente étude (tiré du dictionnaire de la carte écoforestière du Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2023)

3.2.2 Comparaison du paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence.

Pour prendre en compte la variabilité des milieux biologiques, notre approche s'est basée sur un échantillonnage aléatoire. En effet pour déterminer le nombre des sites de référence à utiliser, le chiffre cinq a été tiré au sort. À titre de comparaison, les cinq superficies (sites de référence) de la taille moyenne de 318 ha ont été distribuées dans l'environnement immédiat, tout autour de chaque site minier de manière aléatoire. Une distance de 1500 m minimale a été respectée entre le site minier et les cinq sites témoins. Le choix de la taille des sites de référence a été fait en considérant une « mine-type » qui correspond à des valeurs médianes des différentes caractéristiques des six sites miniers étudiés, dont la superficie des infrastructures minières (haldes, bassins, fosses). La description de la mine-type est présentée en annexe.

Pour chacun des sites de référence, les attributs des variables couvertures forestières, classe d'âges des forêts et types de terrains ont été extraits, moyennés et ensuite ont servi de référence pour la comparaison. Les valeurs minimum, moyenne et maximums obtenus ont été comparées aux observations de la zone tampon de 250 m pour chaque site minier. Cette distance de 250 m a été choisie en sur la base des résultats obtenus lors des travaux antérieurs de Yin et al., 2022. La comparaison entre le paysage forestier à proximité du site minier et celui éloigné (non impacté par les opérations minières) a permis de caractériser le paysage forestier environnant. La figure montre le schéma simplifié de la démarche utilisée.

Pour procéder à la comparaison du paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence, notre analyse s'est basée sur les paramètres statistiques (le maximum, le minimum et la moyenne et l'écart-type) tout en tenant en compte les variables retenues. Dans cette démarche méthodologique, deux critères d'analyse ont été choisis, des codes et des couleurs ont été utilisés pour faciliter la compréhension de la démarche. Les codes et les couleurs établissent la situation observée sur les figures entre le paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence. Le tableau 7 présenté au chapitre 4 montre quelques figures à titre d'exemples.

➤ Choix des critères d'analyse

1- Pourcentage de distribution : Il a été choisi pour chaque cas, un taux de variation du pourcentage de distribution de la valeur numérique de la moyenne en utilisant l'écart-type des sites de référence. Toutes les valeurs de distribution qui entrent dans cet intervalle, sont considérées pas différent du paysage des sites de référence.

2- Proportion de la distance : étant donné que l'analyse s'effectue sur une distance, il a été choisi :

✚ **OUI** indique que le paysage se trouvant à proximité du site minier est très différent du paysage forestier des sites de référence. Soit de 50 à 100% de la distribution des variables pour le site minier est supérieure ou inférieure à la moyenne des sites de référence.

✚ **NON** indique que le paysage se trouvant à proximité du site minier n'est pas différente du paysage forestier des sites de référence. Soit de 50 à 100% de la distribution des variables pour le site minier se trouvent dans l'intervalle de la moyenne des sites de référence.

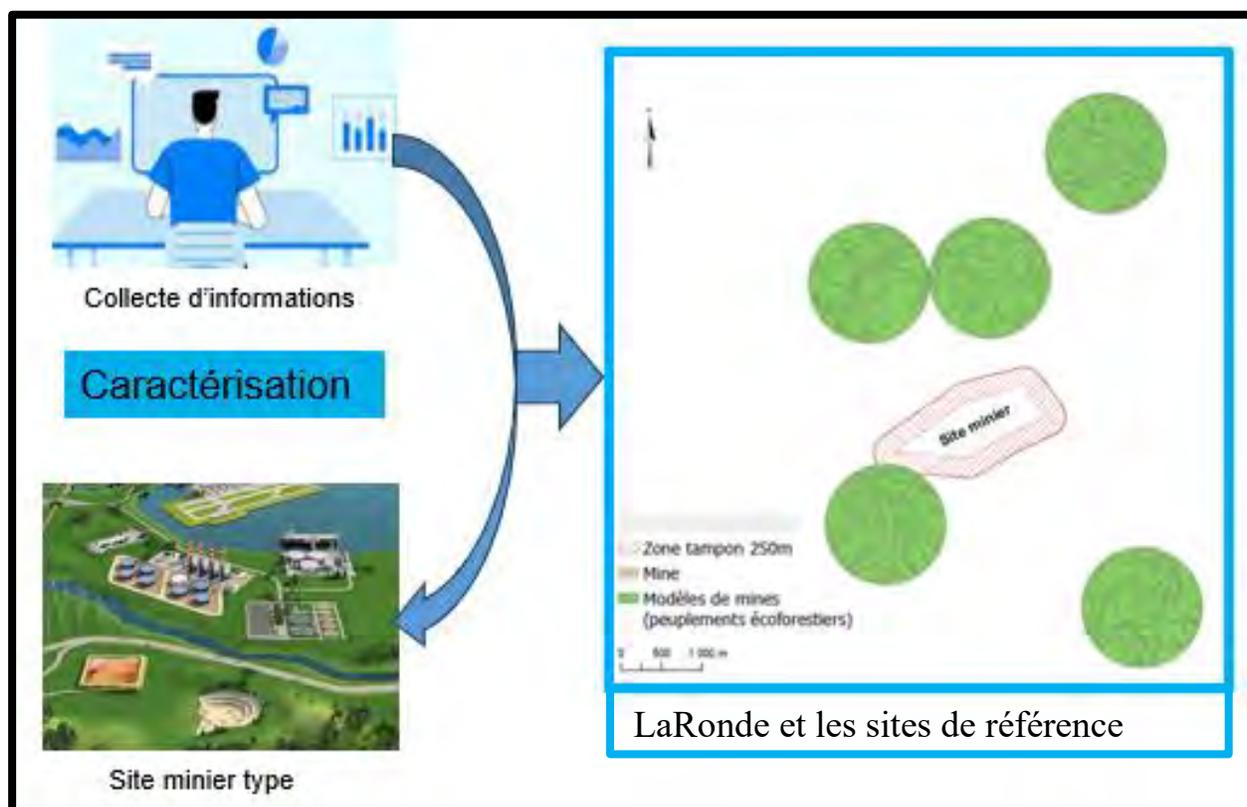


Figure 21 : Shema simplifié de la marche utilisée

4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

4.1 Caractérisation du paysage forestier à proximité de chaque site minier.

Pour évaluer l'ampleur des impacts des infrastructures minières sur les écosystèmes forestiers, nous avons procédé à une caractérisation détaillée du paysage forestier à proximité de chaque site minier. Grâce aux outils d'analyse spatiale et de la carte écoforestière, les distributions des variables comme les types de couverture forestière (feuillus, mixtes et résineux), les types de terrain (anthropiques et dénudés humides) et la classe d'âge des forêts tout autour des sites miniers (0-30 ans, 31-70 ans et 71 ans et plus) ont été extraits pour une distance totale de 250 m à partir des abords des infrastructures minières des sites. Les résultats ci-dessous ont été obtenus.

4.1.1 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Canadian Malartic.

La figure 22 présente la distribution des types de couvertures forestières en fonction des zones à proximité du site minier Canadian Malartic. Sur cette figure, les feuillus montrent une répartition relativement stable de la zone 1 à la zone 25 (10% et 16% respectivement), avec une légère augmentation pour les zones éloignées. Les pourcentages pour les forêts mixtes présentent des valeurs élevées pour les zones se trouvant à proximité des infrastructures minières, la zone 1 est de 21% et la zone 25 est de 16%. Une augmentation des résineux est observée pour la zone 1 avec 22% jusqu'à la zone 16 avec 31%. Tandis que de la zone 17 à la zone 25, la distribution est peu variable, soit de 31% à 35%.

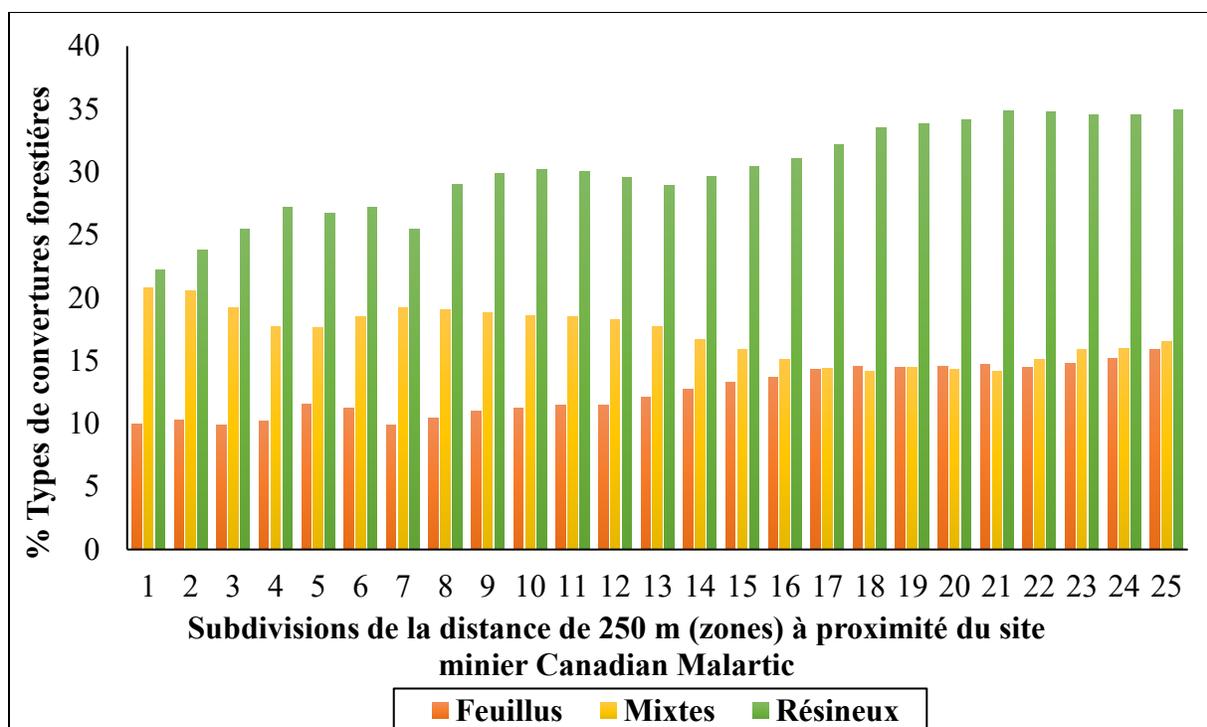


Figure 22 : Distribution de la classe du type de couvertures forestières à proximité du site minier Canadian Malartic.

4.1.2 L'âge des forêts à proximité du site minier Canadian Malartic.

La figure 23 présente la distribution de la classe d'âge des forêts en fonction des zones à proximité du site minier Canadian Malartic. Il a été constaté sur cette figure une légère augmentation de la distribution pour les plus jeunes forêts dont l'âge se situe entre 0 et 30 ans, soit de la zone 1 (18%) jusqu'à la zone 25 (24%). Pour la classe d'âge de 31-70 ans, la distribution est de la zone 1 est de 10% et celui de la zone 25 est de 20%. Pour les vieilles forêts, dont l'âge varient de 71 ans et plus, des valeurs stables pour toutes les zones ont été observées, la distribution pour la zone 1 est de 25% et celle de la zone 25 est 24%.

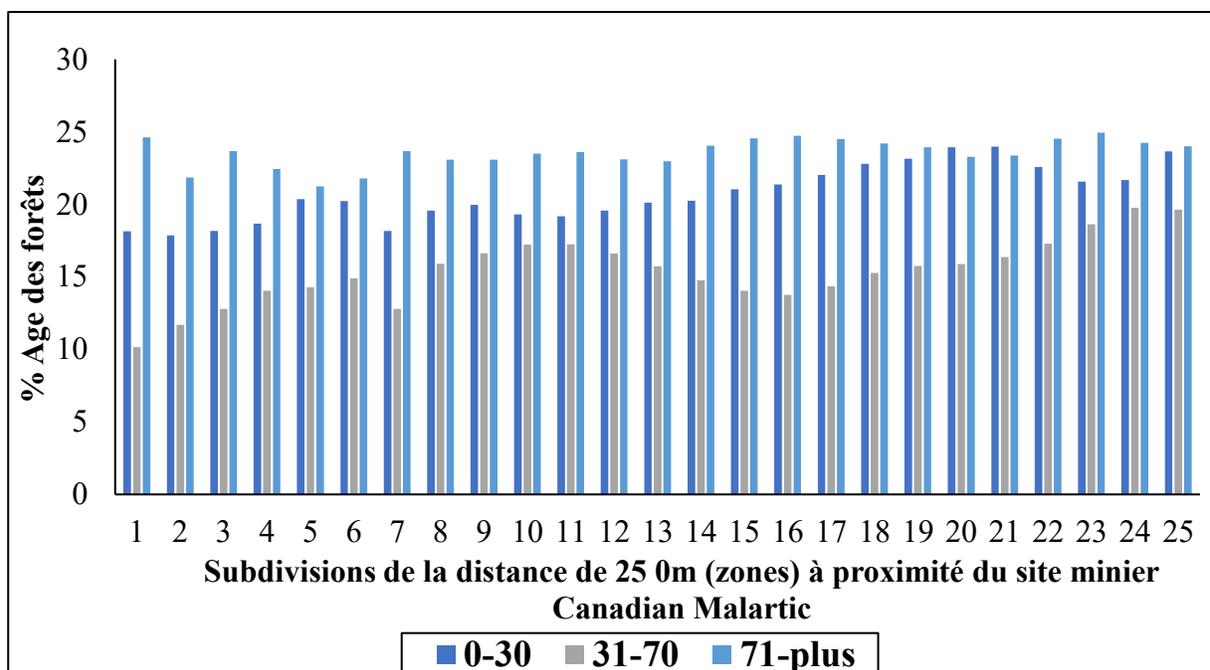


Figure 23 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier Canadian Malartic.

4.1.3 Les types de terrains (CO-TER) à proximité du site minier Canadian Malartic.

La figure 24 montre que les abords des installations minières sont plus anthropisées (ANT), des distributions élevées de la zone 1 (31%) jusqu'à la zone 15 (18%) et une stabilisation à partir de la zone 16 (17%) jusqu'à la zone 25 (16%) ont été observées. Quant à la classe des terrains dénudés humides (DH), il a été observé une augmentation de la distribution au fur et à mesure que l'on s'éloigne des abords des infrastructures minière soit de la zone 1 avec 1% jusqu'à la zone 14 avec 4%. A partir de la zone 15 (5%) les pourcentages augmentent faiblement mais en se stabilisant jusqu'à la zone 25 (7%).

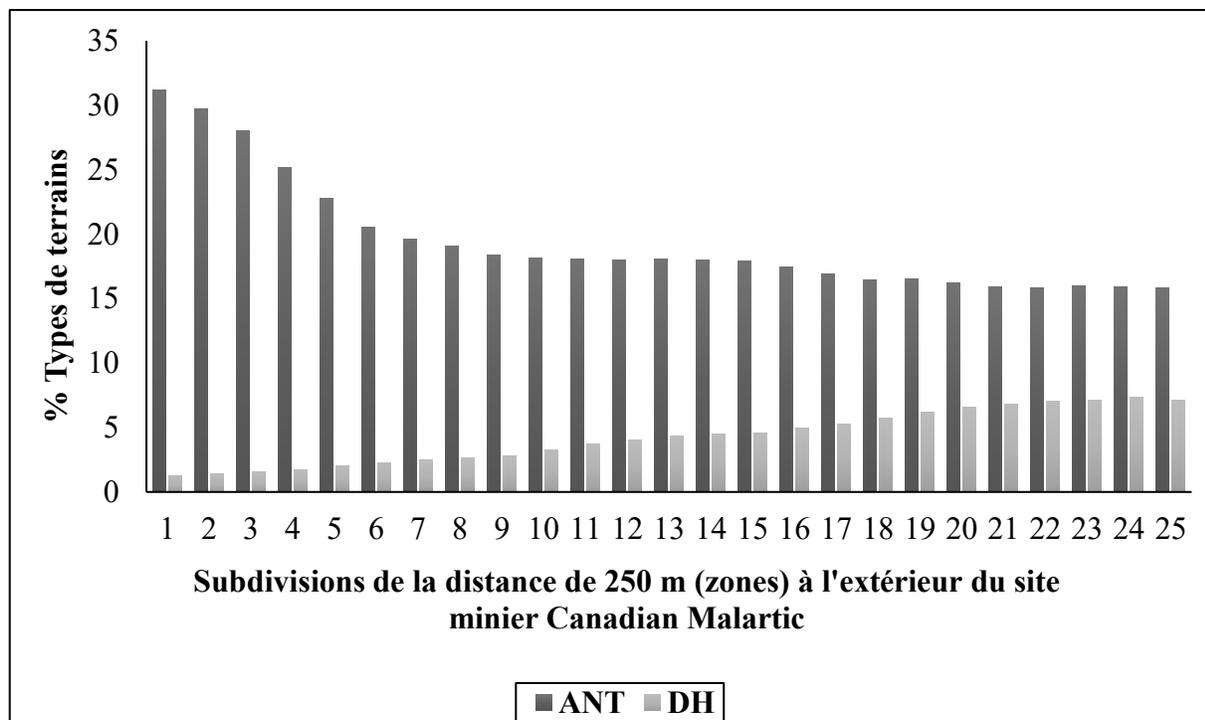


Figure 24 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité du site minier Canadian Malartic

4.1.4 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier de LaRonde.

La figure 25 présente la distribution des types de couvertures forestières en fonction des zones à proximité du site minier de LaRonde. Globalement, une faible variation du pourcentage de distribution des feuillus pour toutes les zones analysées a été observée, soit pour la zone 1 de 9% et pour la zone 25 de 17%. Pour les mixtes et les résineux, un effet de vague a été observé, soit pour les mixtes un minimum de 25% pour la zone 1 et un maximum de 50% pour la zone 18. Pour les résineux, un minimum de 0% pour la zone 14 (0%), et un maximum de 5% pour la zone la zone 20 (5%) ont été observés. Mais la classe de forêts mixtes enregistre des pourcentages élevés par rapport aux résineux et les feuillus.

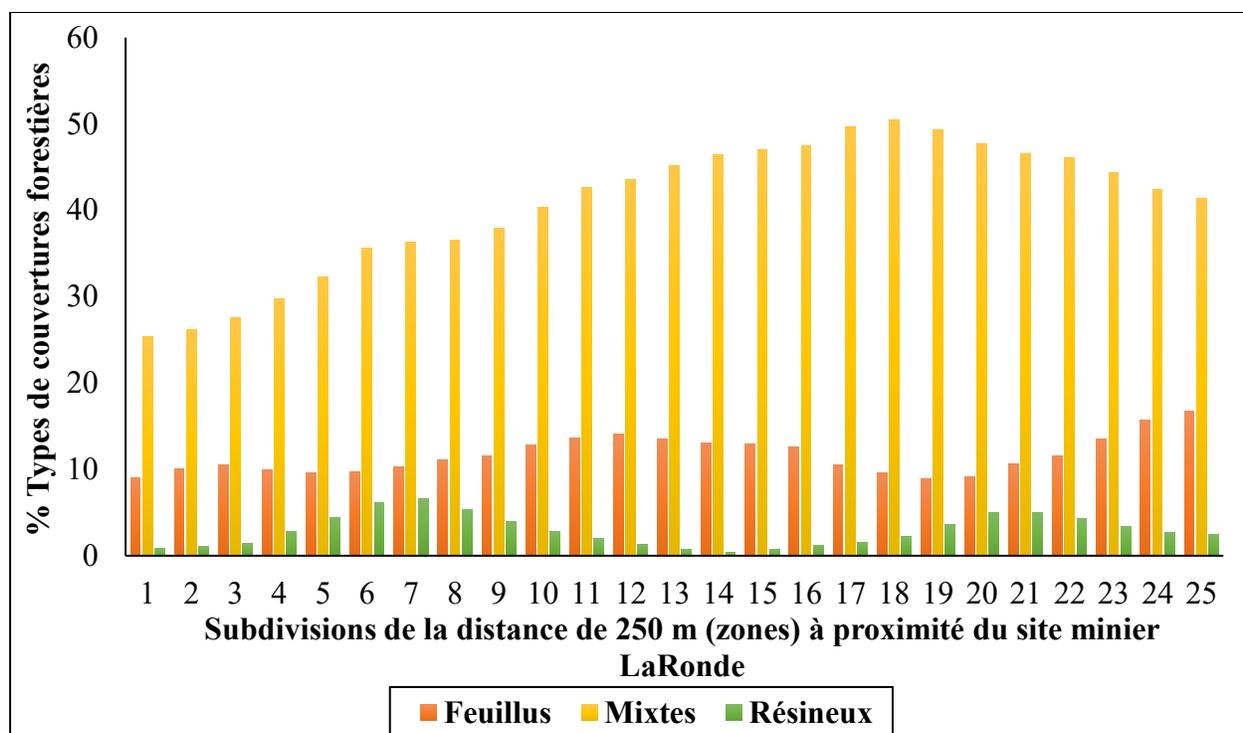


Figure 25 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du site minier LaRonde.

4.1.5 L'âge des forêts à proximité du site minier LaRonde.

La figure 26 présente la distribution de la classe d'âge des forêts en fonction des zones à proximité du site minier LaRonde. D'une façon générale, les pourcentages des jeunes forêts (0-30 ans) augmentent légèrement de la zone 1 à la zone 17, soit de 18% à 28% respectivement, à partir de la zone 18 avec 29%, une stabilisation est constatée jusqu'à la zone 25 avec 30%. Un effet de vague est observé pour les deux classes d'âge, soit pour la classe d'âge moyen (31-70 ans) avec un minimum de 6% pour la zone 1 et un maximum de 19% pour la zone 21 et pour la classe d'âge de 71 ans et plus, avec un minimum de 10% pour la zone 3 et un maximum de 17% pour la zone 14.

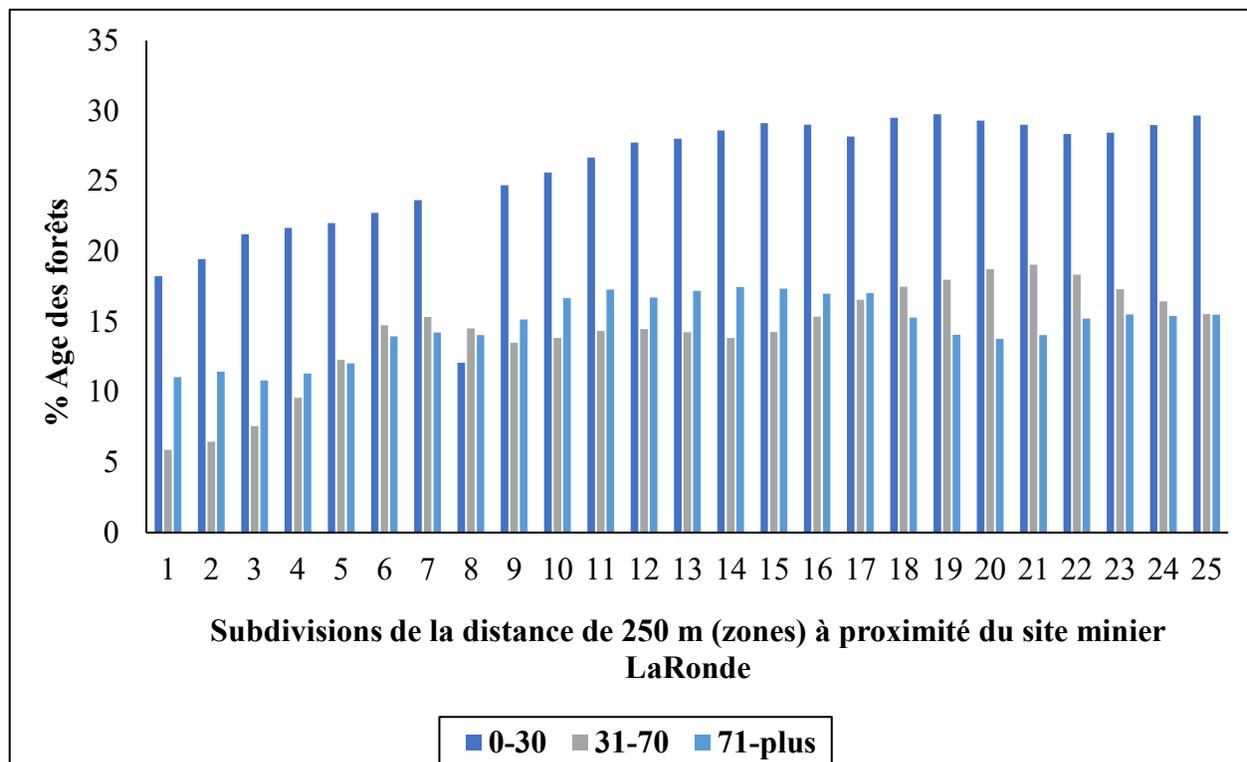


Figure 26 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier LaRonde.

4.1.6 Les types de terrains (CO-TER) à proximité du site minier LaRonde

La figure 27 présente la distribution de la classe des types de terrains (CO-TER) en fonction des zones à proximité du site minier LaRonde. Sur cette figure, des variations des pourcentages sur toute la distance analysée ont été observées. Les terrains anthropisés montrent des distributions élevées pour les zones qui se situent à proximité des installations minières comparativement aux zones éloignées, soit pour la zone 1 (62%) et pour la zone 25 (18%). La classe des terrains dénudés humides montre des pourcentages de distribution faibles pour toute la distance analysée à l'extérieur du site minier, soit pour la zone 1 de 1% et pour la zone 25 de 0%.

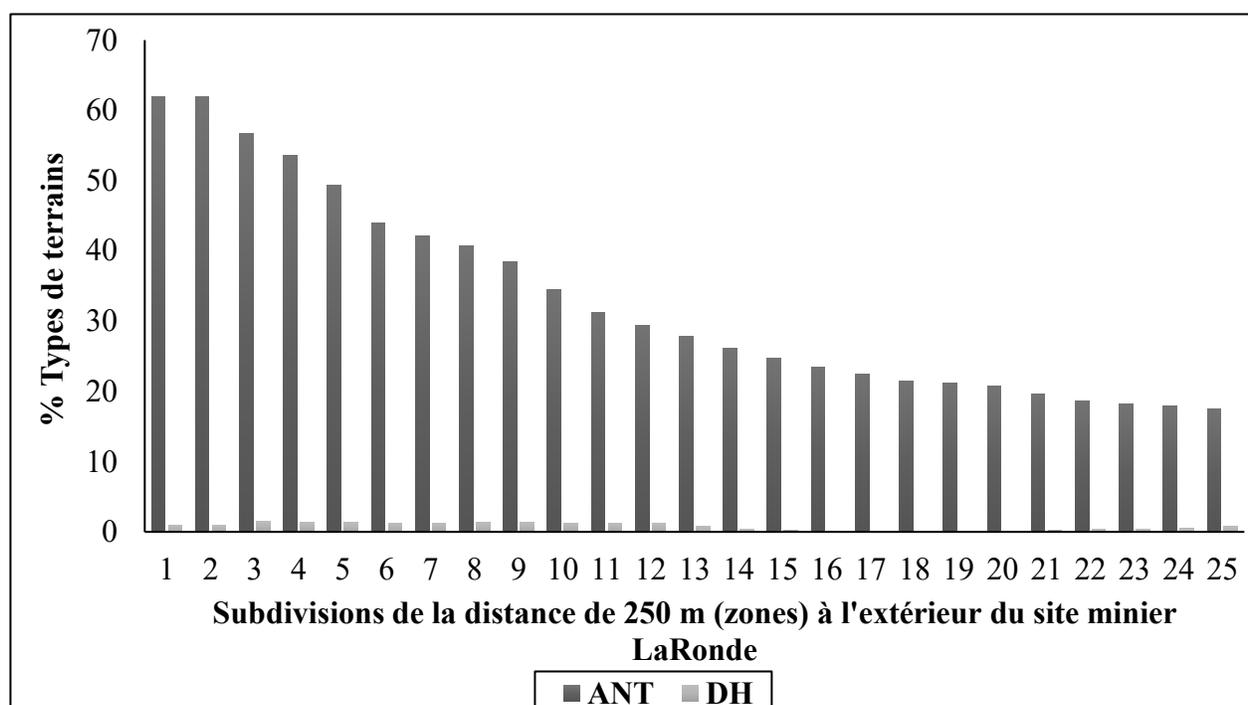


Figure 27 : Distribution de la classe de types de terrain en fonction des zones à proximité du site minier LaRonde.

4.1.7 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Casa Berardi

La figure 28 présente la distribution de la classe des types de couvertures forestières en fonction des zones à proximité du le site minier Casa Berardi. Sur cette figure, la classe des feuillus est présente seulement de la zone 1 avec 3% à la zone 6 avec 1%. A partir de la zone 7 jusqu'à la zone 25, les pourcentages de distribution sont de 0%. Pour la classe des mixtes, des pourcentages de distribution faibles ont été observés à proximité du site minier, soit à partir de la zone 1 (0%) jusqu'à la zone 12 (1%). Les zones éloignées présentent des pourcentages de 2% pour la zone 13 et 5% pour la zone 25. La classe des résineux montre un effet de vague dont le minimum est de 37% pour la zone 16 et 17 et le maximum est de 46% pour la zone 25.

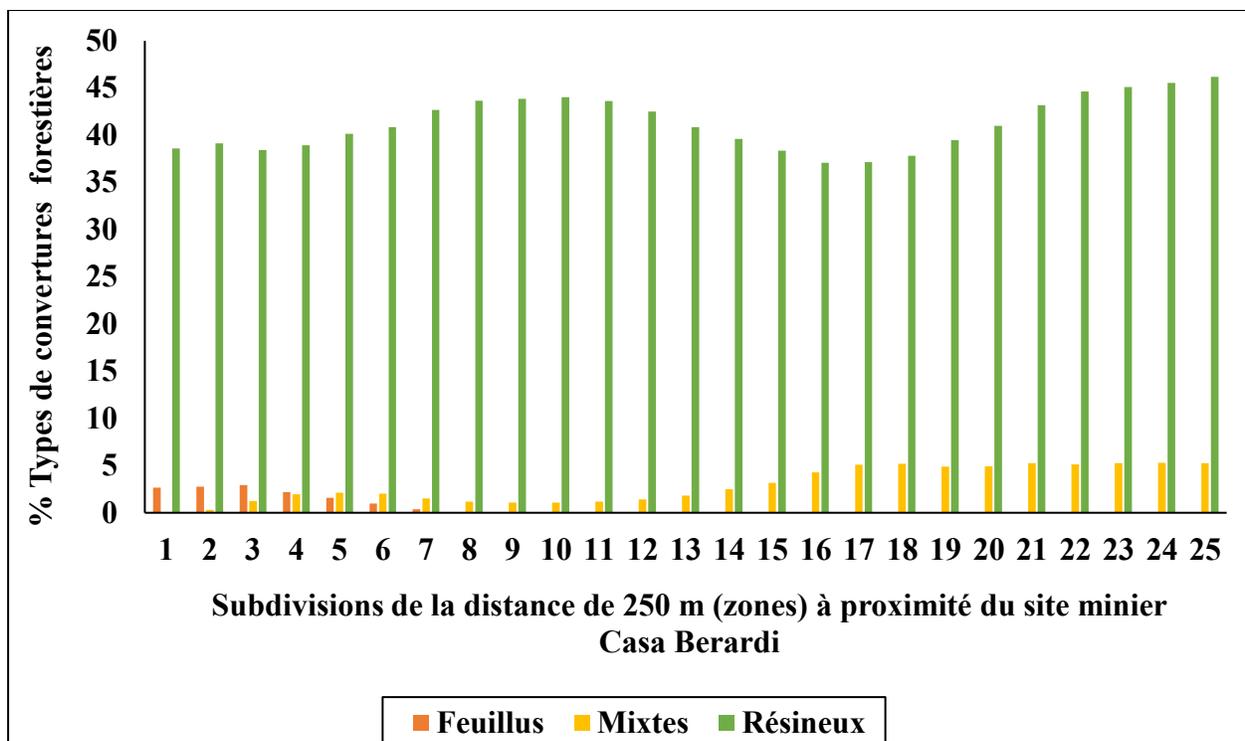


Figure 28 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du site minier Casa Berardi.

4.1.8 L'âge des forêts à proximité du site minier Casa Berardi.

La figure 29 présente la distribution de la classe d'âge des forêts en fonction des zones à proximité du site minier Casa Berardi. Les pourcentages de distribution de la classe des jeunes forêts (0-30 ans) diminuent légèrement de la zone 1 (24%) jusqu'à la zone 25 (21%). Pour les forêts d'âge moyen (31-70 ans), les pourcentages sont nuls de la zone 1 jusqu'à la zone 25. La classe d'âge formée par les vieilles forêts (71 ans et plus), la distribution est stable autour des 190 m à partir des abords, et par la suite une légère augmentation pour les zones éloignées, soit 17% pour la zone 1 et 30% pour la zone 25.

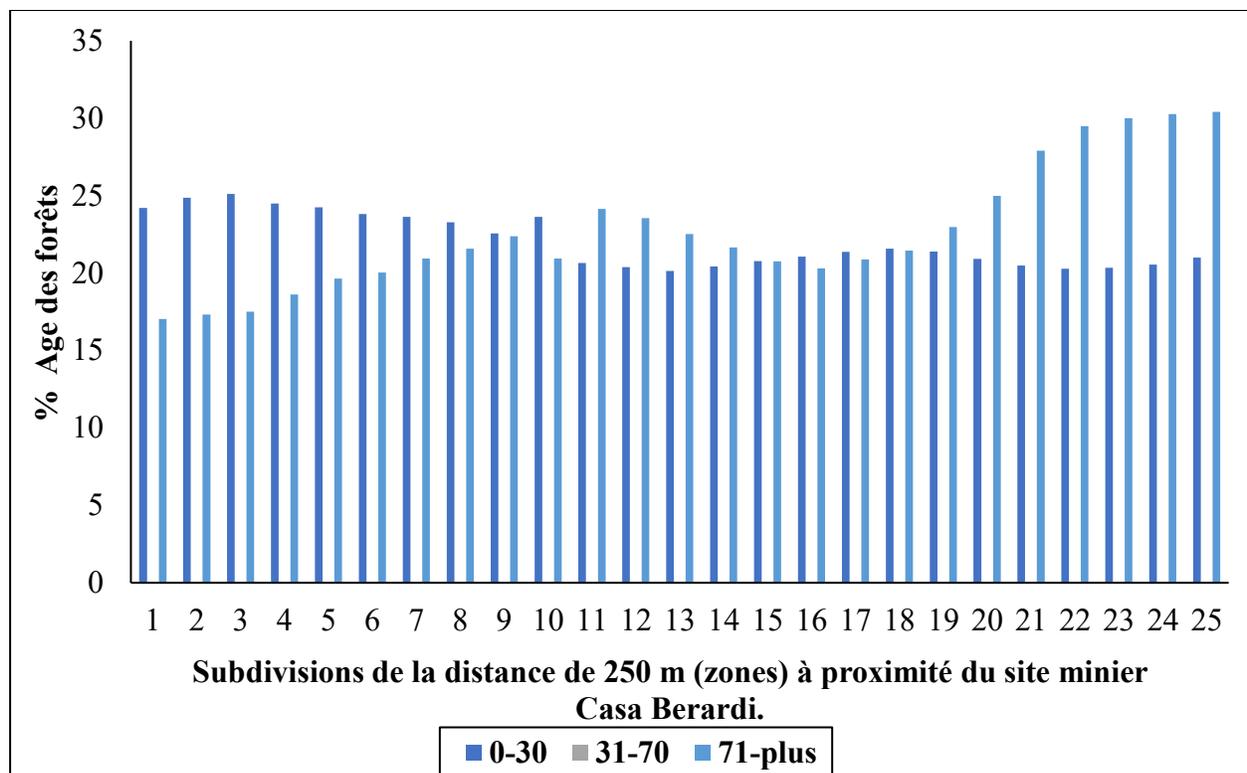


Figure 29 Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier Casa Berardi.

4.1.9 Les types de terrains (CO-TER) à proximité du site minier Casa Berardi.

La figure 30 présente la distribution de la classe des types de terrain (CO-TER) en fonction des zones à proximité du site minier Casa Berardi. Il a été constaté que les zones se trouvant à proximité du site minier présentent des pourcentages de distribution élevés pour la classe des terrains anthropisés, soit de la zone 1 avec 29% jusqu'à la zone 13 avec 17%. Quant aux zones éloignées, une diminution du pourcentage de distribution à partir de la zone 14 (15%) jusqu'à la zone 25 (5%) a été observée. La classe des terrains dénudés humides montre une augmentation considérable au fur et à mesure que l'on s'éloigne des abords de installations minières. Les pourcentages de distribution sont pour la zone 1 de 15%, et pour la zone 25 de 35 %.

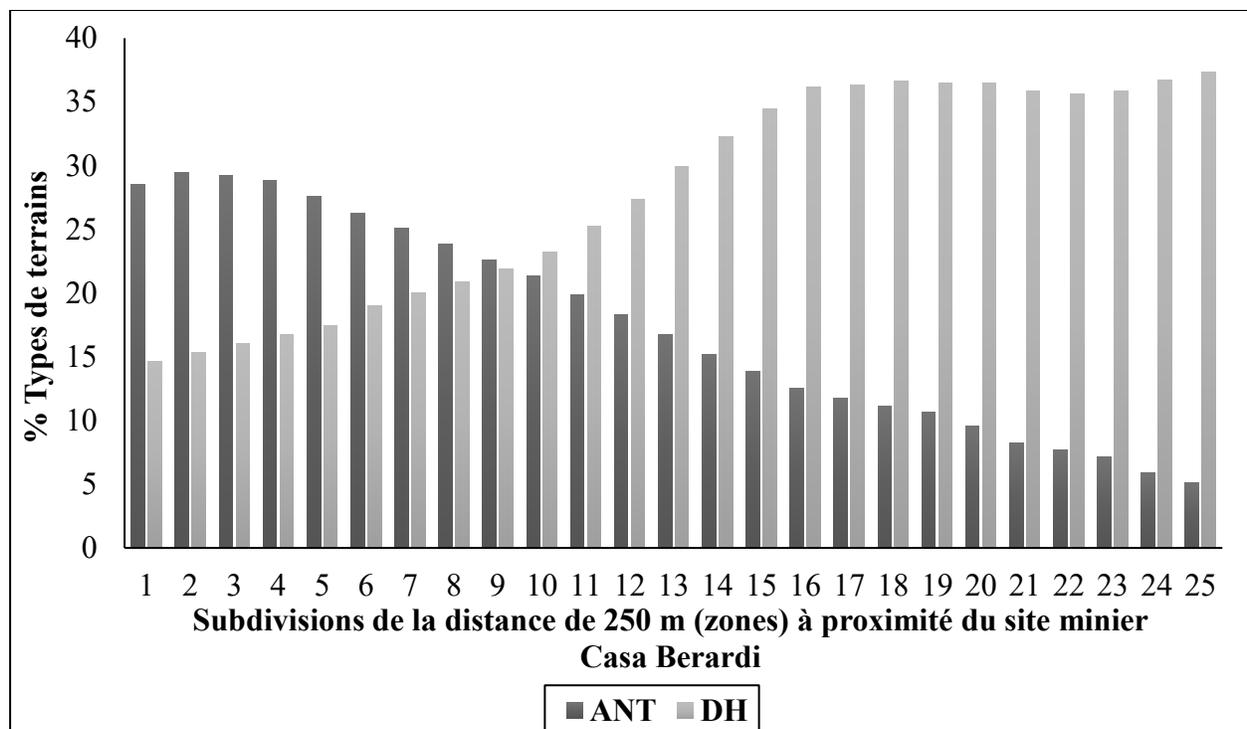


Figure 30 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité du site minier Casa Berardi.

4.1.10 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Joutel.

La figure 31 présente la distribution de la classe des types de couvertures forestières en fonction des zones à proximité de l'ancien site minier Joutel. L'effet de vague a été observé pour la classe des feuillus et celle des mixtes. Pour les feuillus, des pourcentages faibles sont enregistrés pour les zones se trouvant à proximité de l'ancien site minier, soit 6% pour les zones 1, 2 et 3 comparativement aux zones éloignées ayant des pourcentages élevés, soit 16% pour la zone 25. Pour la classe des mixtes, un minimum 3% pour les zones 21 et 22 et un maximum 8% pour la zone 3. La classe des résineux présente une augmentation des pourcentages de la zone 1 avec 8% jusqu'à la zone 25 avec 36%.

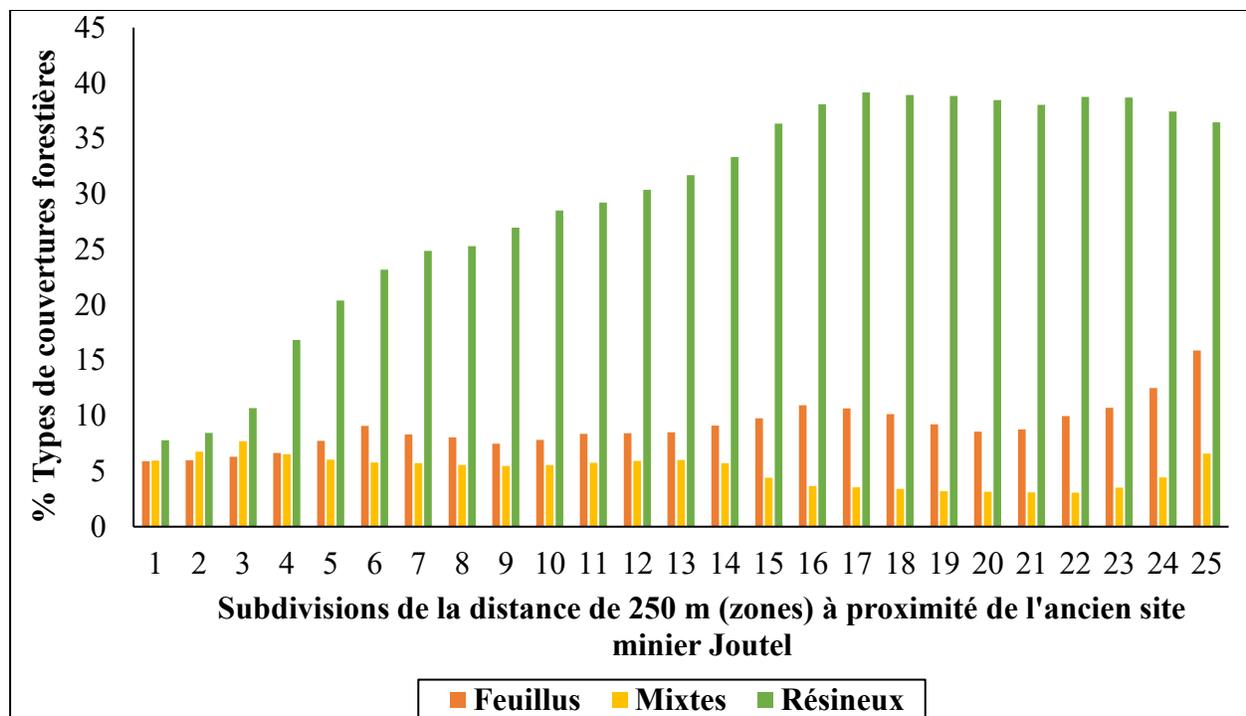


Figure 31 Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité de l'ancien site minier Joutel.

4.1.11 L'âges des forêts à proximité du site minier Joutel.

La figure 32 présente la distribution de la classe d'âge des forêts en fonction des zones à proximité du site minier Joutel. Pour les jeunes forêts (0-30 ans), il a été remarqué des pourcentages faibles de la zone 1 (2%) jusqu'à la zone 13 (6%). Une légère augmentation du pourcentage a été constaté de la zone 14 (7%) jusqu'à la zone 25 (12%). Quant aux forêts de la classe d'âge moyen (31-70 ans), des pourcentages élevés ont été enregistrés pour les zones se trouvant à proximité du site minier, soit 10% pour les zones 5, 6, 7 et 8, et des faibles pourcentages pour les zones éloignées soit 6% pour les zones 23, 24 et 25. Pour les forêts de la classe d'âge 71 ans et plus, les pourcentages augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne des abords du site minier, soit de 14% pour la zone 1 à 42% pour la zone 25.

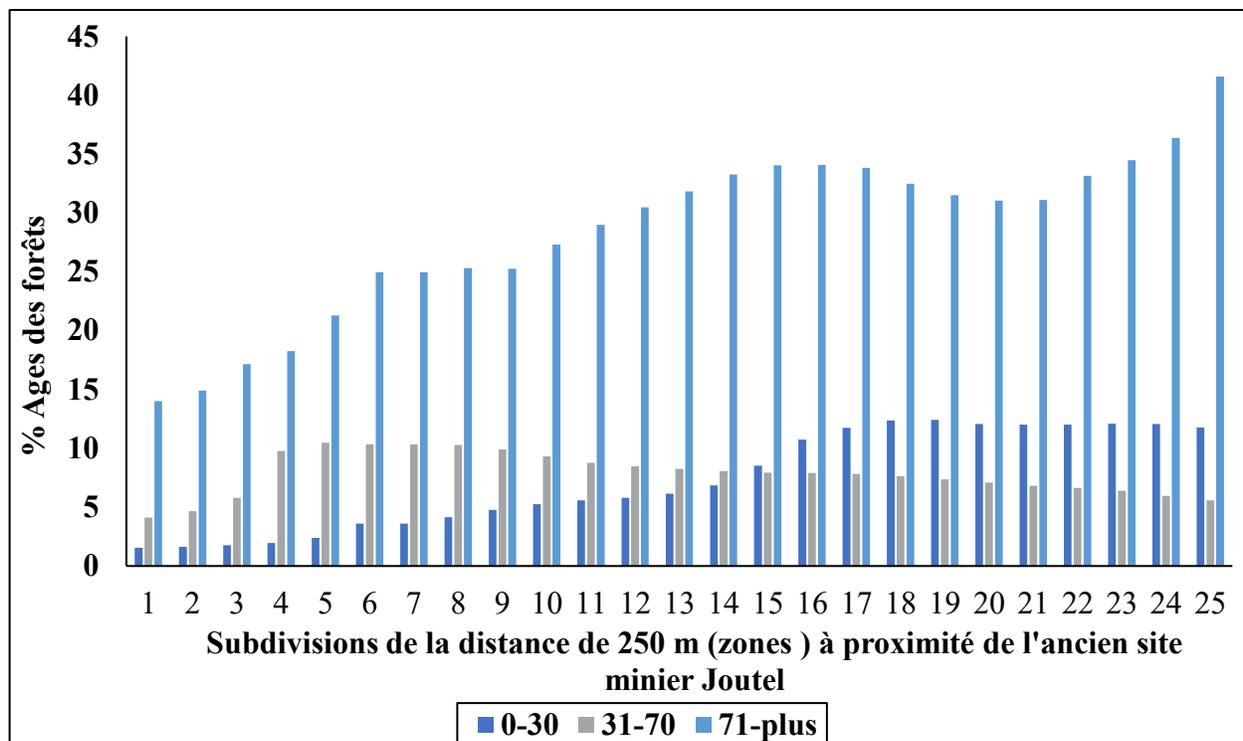


Figure 32 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité de l'ancien site minier Joutel.

4.1.12 Les types de terrains (CO-TER) à proximité du site minier Joutel.

La figure 33 présente la distribution de la classe des types de terrains (CO-TER) en fonction des zones à proximité du site minier de Joutel. Il a été constaté que les abords des anciennes installations minières sont plus anthropisées : le pourcentage de distribution de la zone 1 est de 75% et celui de la zone 25 est de 7. Un effet de vague a été observé pour la classe des terrains dénudés humides, avec un maximum de 14% pour la zone 23 et minimum de 2% pour la zone 1.

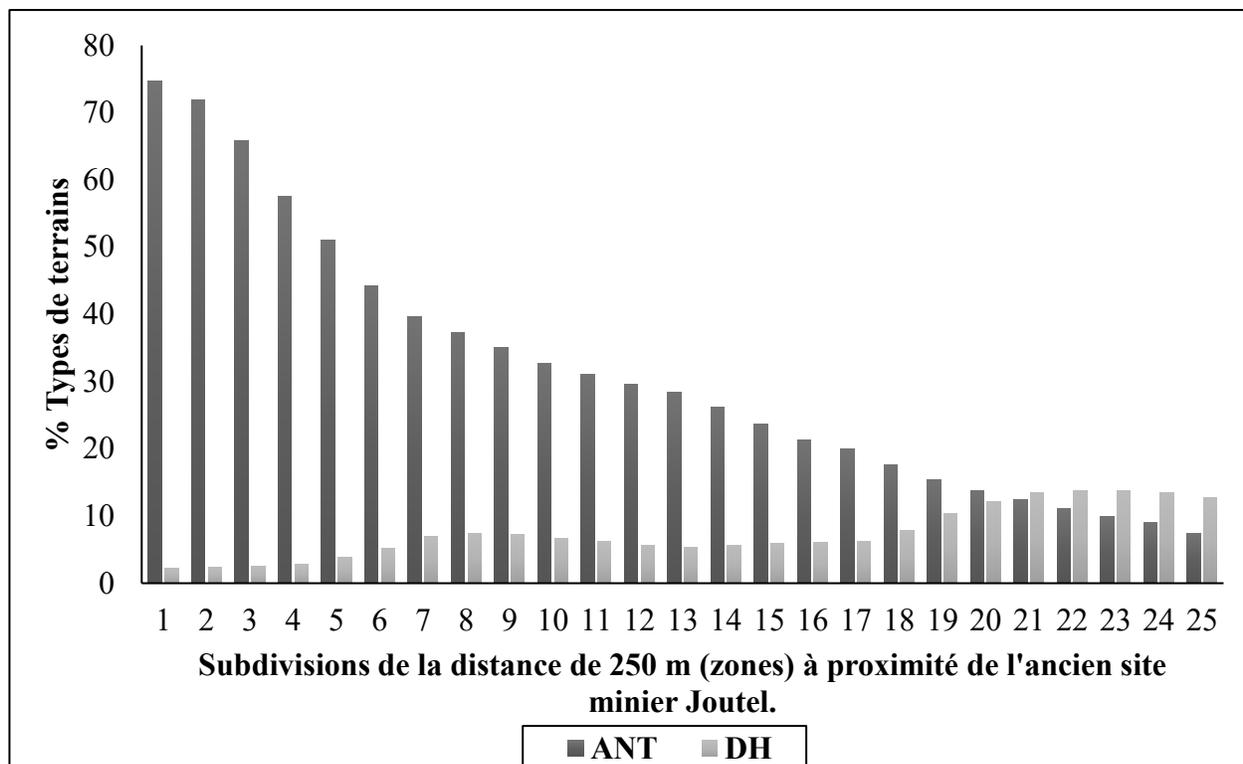


Figure 33 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité de l'ancien site minier Joutel.

4.1.13 Les types de couvertures forestières à proximité du site minier Lapa

La figure 34 présente la distribution de la classe des types de couvertures forestières en fonction des zones à proximité de l'ancien site minier Lapa. Les pourcentages de distribution de la classe des feuillus sont de 0% de la zone 1 jusqu'à la zone 25. La distribution de la classe des forêts mixtes montre un effet de vague, soit une augmentation de la zone 1 (28%) jusqu'à la zone 13 (54%), une diminution de la zone 14 (52%) jusqu'à la zone 20 (20%), et une stabilisation à partir de la zone 21 (41%) jusqu'à la zone 25 (40%). La distribution pour la classe des résineux montre une augmentation de la zone 1 (26%) jusqu'à la zone 13 (32%) et une diminution de la 14 (26%) jusqu'à la zone 25 (23%).

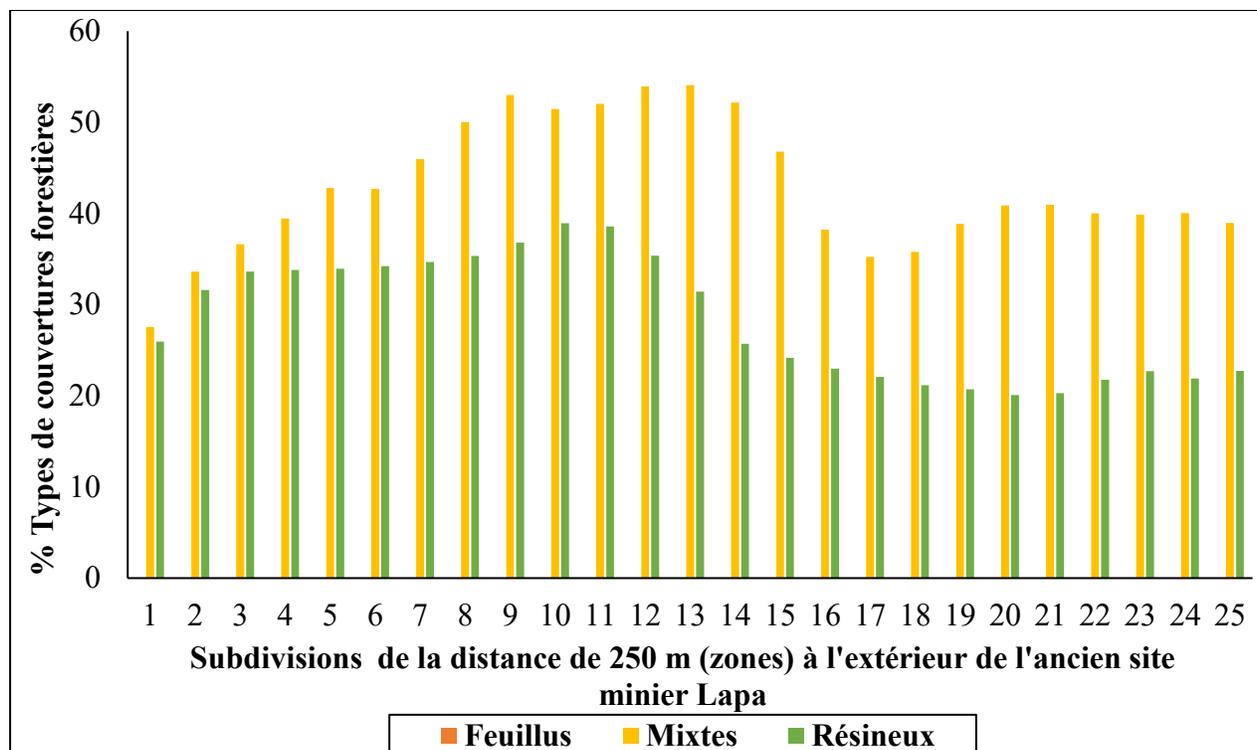


Figure 34 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du site minier Lapa.

4.1.14 L'âge des forêts à proximité du site minier Lapa.

La figure 35 présente la distribution de la classe d'âge des forêts en fonction des zones à proximité de l'ancien site minier Lapa. La classe les forêts dont l'âge se situe de 0 à 30 ans a un pourcentage nul (0%) pour les zones qui se trouvent à proximité des installations minières, soit de la zone 1 à la zone 12. A partir de la zone 13 (1%) jusqu'à la zone 25 (18%), une augmentation a été observée. La classe d'âge de 31-70 ans présente des pourcentages de distribution nuls (0%) pour toute la distance analysée. Pour les forêts d'âge de 71 ans et plus, les pourcentages augmentent de la zone 1 (54%) jusqu'à la zone 12 (89%), mais à partir de la zone 13 (85%) jusqu'à la zone 25 (45%), les pourcentages de distribution diminuent.

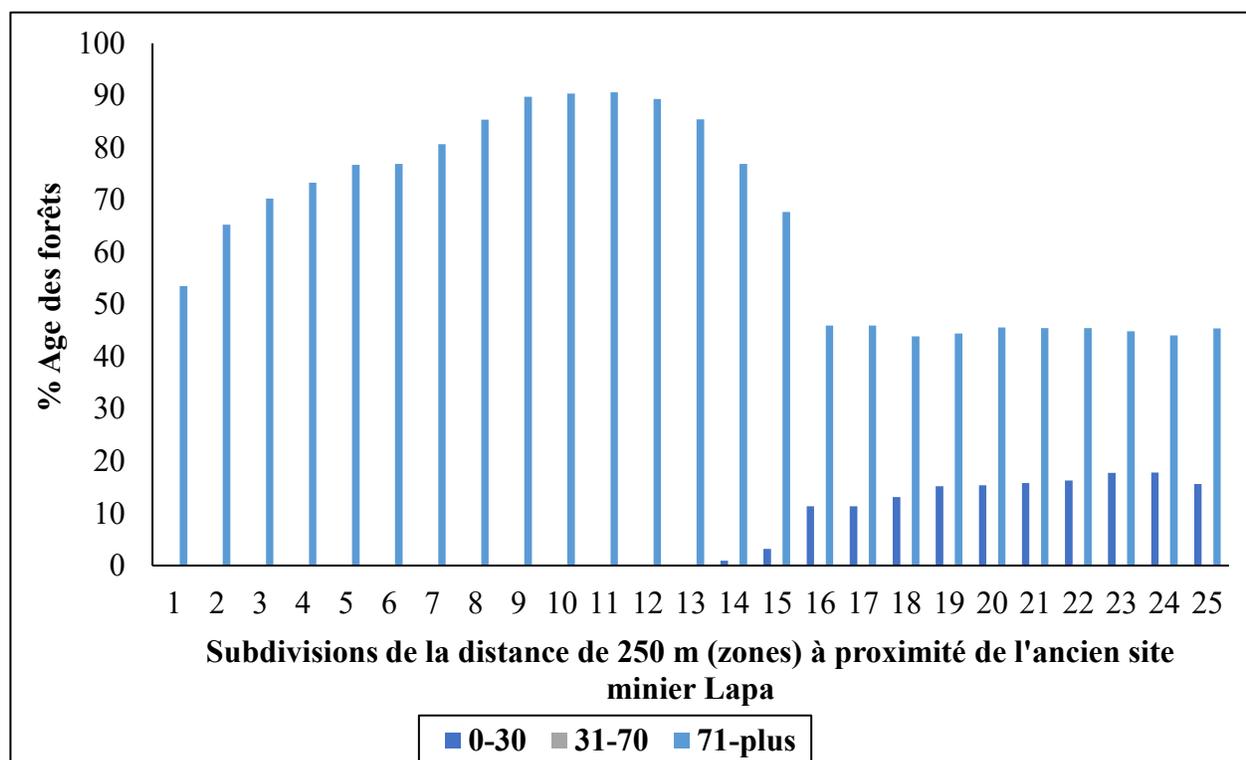


Figure 35 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du site minier Lapa.

4.1.15 Les types de terrains (CO-TER) à proximité du site minier Lapa

La figure 36 présente les pourcentages de répartition de la classe de types de terrains (CO-TER) en fonction des zones à proximité de l'ancien site minier Lapa. Une diminution globale pour les terrains anthropiques (ANT) a été remarquée. Il a été constaté que les pourcentages à proximité des abords de l'ancien site minier sont élevés soit pour la zone 1 (46%) comparativement aux zones éloignées qui ont des pourcentages faibles soit pour la zone 25 (5%), mais le minimum est de 2% pour la zone 13. Pour la classe de dénudé humide, une légère oscillation est observée avec un minimum de 0% pour les zones 1, 2, 3, 4 et un maximum de 6% pour la zone 7.

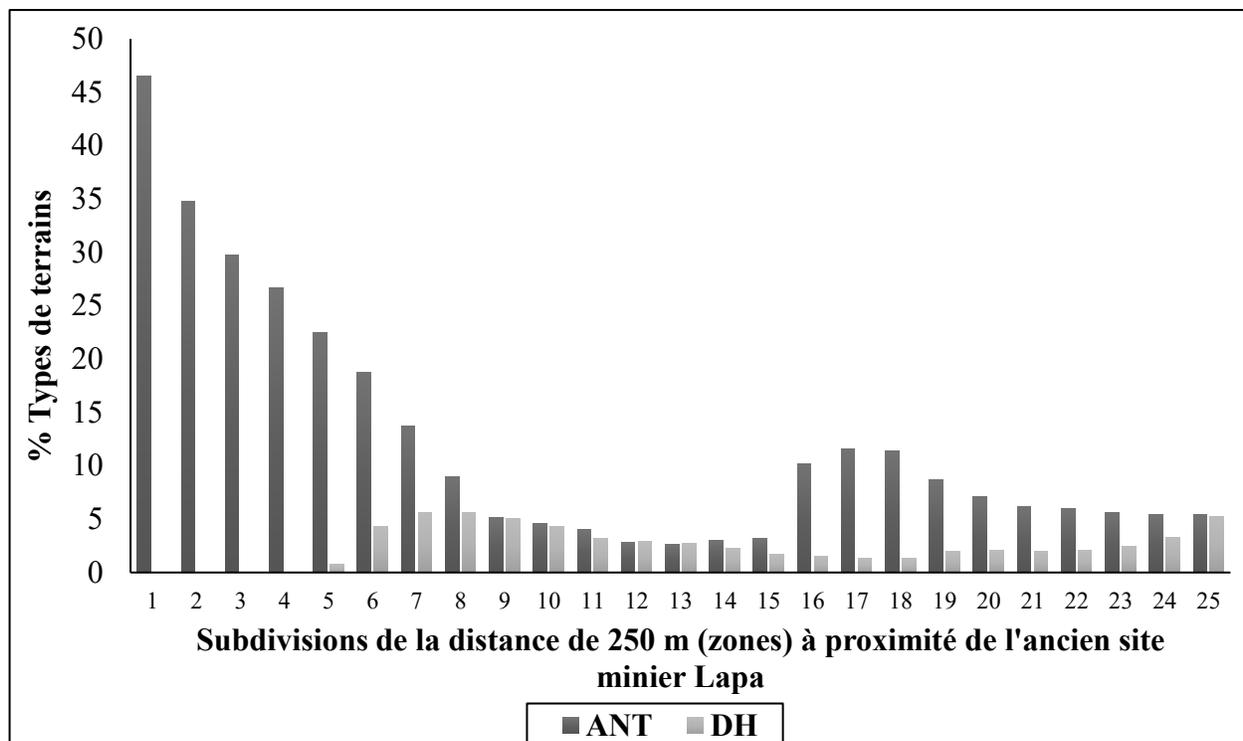


Figure 36 Distribution de la classe de types de terrains à proximité du site minier Lapa.

4.1.16 Les types de couvertures forestières à proximité du projet minier Akasaba.

La figure 37 présente la distribution de la classe des types de couvertures forestières en fonction des zones pour Akasaba. Pour toute la distance analysée (250 m) se trouvant à l'extérieur du projet minier, les pourcentages de distribution de la classe des feuillus sont nuls (0%). En revanche pour la classe des résineux et des mixtes, de légères variations ont été observées sur toute la distance. Les pourcentages de distribution sont les suivants : pour les résineux, la zone 1 est de 64% et la zone 25 est de 51%. Pour les mixtes, la zone 1 est de 12% et la zone 25 est de 8%.

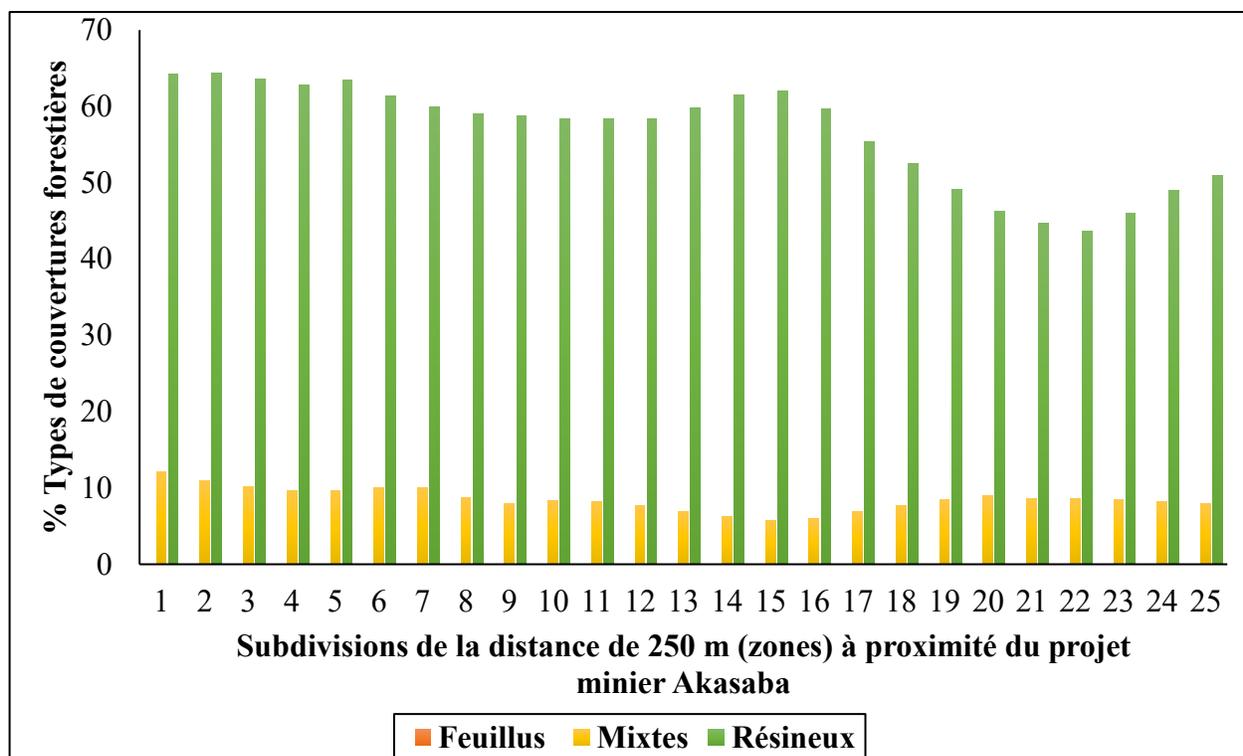


Figure 37 : Distribution de la classe des types de couvertures forestières à proximité du projet minier Akasaba.

4.1.17 L'âge des forêts à proximité du projet minier de Akasaba.

La figure 38 présente la distribution de la classe d'âge des forêts en fonction des zones à proximité du projet minier de Akasaba. La classe d'âge 0-30 ans présente des pourcentages de distribution élevés à proximité du futur site minier, soit de la zone 1 (50%) jusqu'à la zone 9 (30%), et une légère diminution pour les zones éloignées, soit de 23% pour la zone 9 à 17% pour la zone 25. Pour la classe d'âge moyen (31-70 ans), les pourcentages de distribution de la zone 1 jusqu'à la zone 6 sont de 0%. Une faible augmentation de distribution a été constatée à partir de la zone 7 (2%) jusqu'à la zone 25 (7%). Pour les forêts dont l'âge se situe dans la catégorie 71 ans et plus, un effet de vague a été observé avec un minimum de 26% pour la zone 1 et un maximum de 41% pour la zone 15.

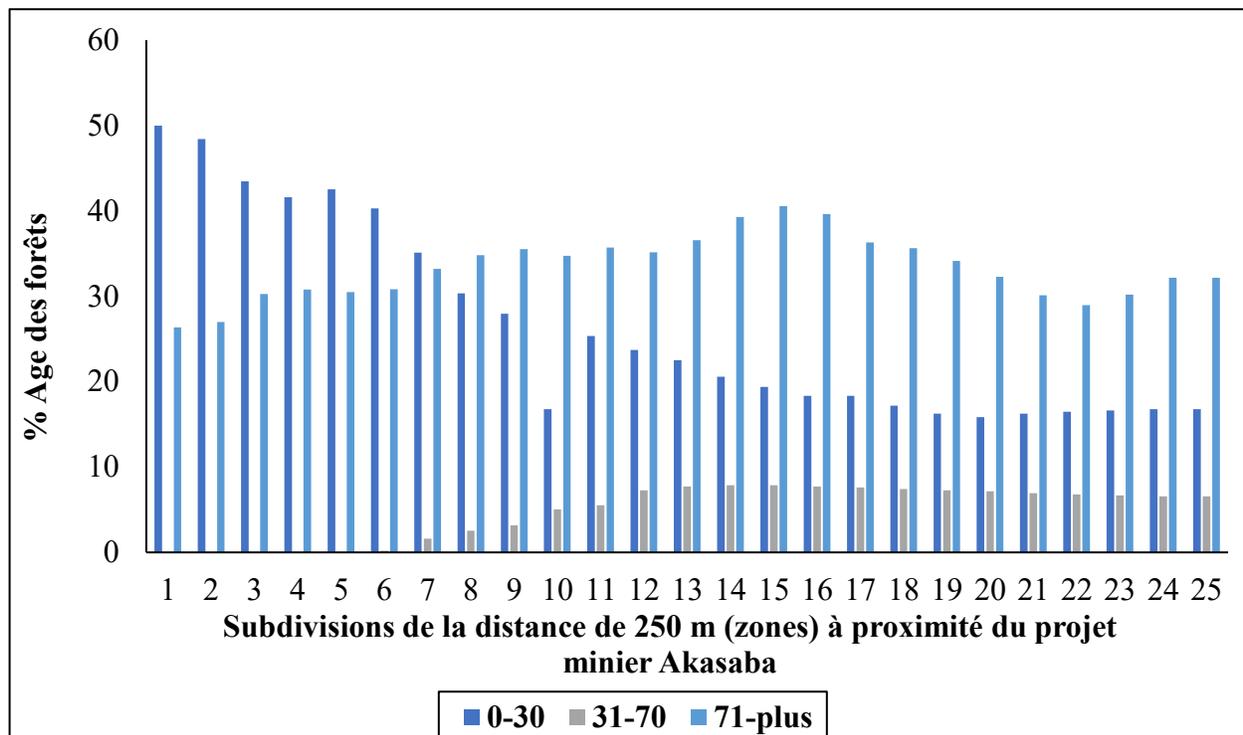


Figure 38 : Distribution de la classe d'âge des forêts à proximité du projet minier de Akasaba.

4.1.18 Les types de terrains à proximité du projet minier Akasaba.

La figure 39 présente la distribution de la classe des types de terrains (CO-TER) en fonction des zones à proximité du projet minier Akasaba. Il a été constaté que pour la classe des terrains anthropiques (ANT), les pourcentages sont nuls pour toutes les zones (zone 1 à zone 25). Quant à la classe des dénudés humides (DH), elle présente une augmentation au fur et à mesure que l'on s'éloigne des abords du projet minier, soit de la zone 1 (13%) jusqu'à la zone 25 (33%).

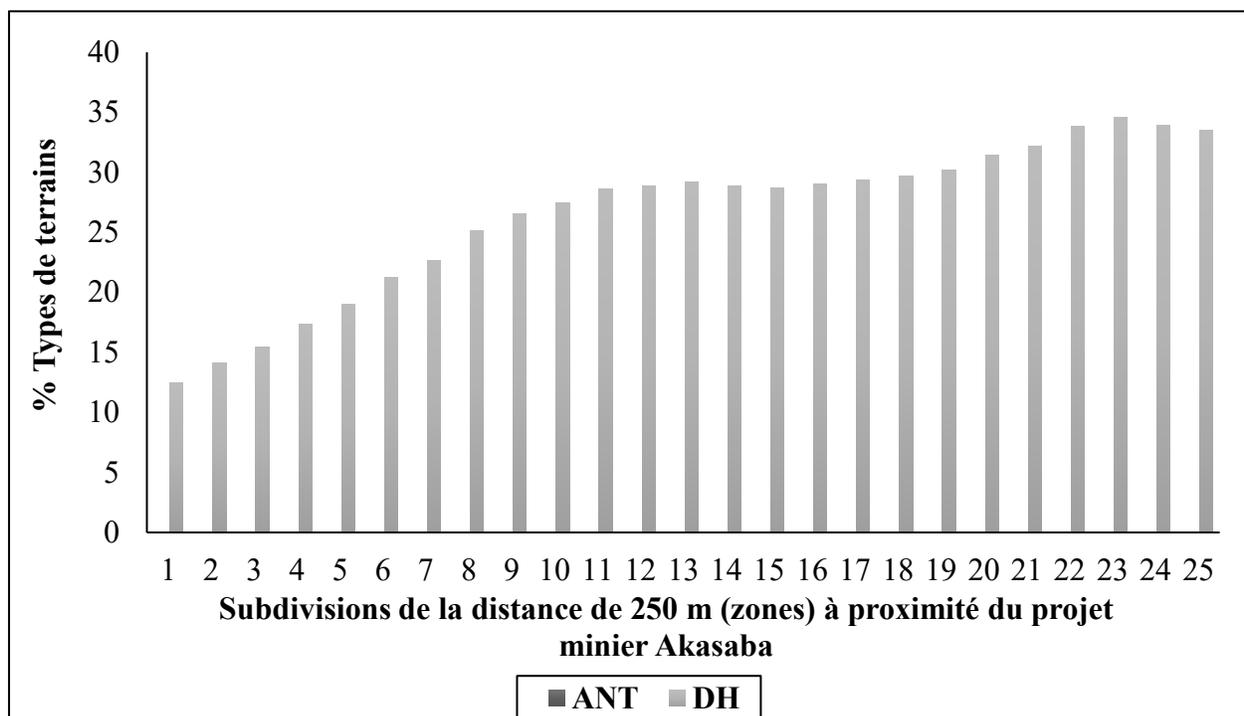


Figure 39 : Distribution de la classe des types de terrains à proximité du futur site minier Akasaba.

4.1.19 Sommaire des résultats

En général, les résultats obtenus ont permis de démontrer que la végétation arborée autour des sites miniers, est perturbée par les impacts hors site des opérations minières. Ces perturbations sont matérialisées par des gradients observés à proximité des sites miniers. Le tableau 5 dresse le résumé des observations générales des résultats obtenus.

Tableau 5 : Sommaire des résultats obtenus

Site minier	Stade évolutif	Observation générales
Canadian Malartic LaRonde Casa Berardi	Active	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les pourcentages de distribution des types de couvertures forestières faibles à proximité des sites miniers; ➤ Les pourcentages de distributions des terrains anthropiques élevés à proximité des sites miniers.
Joutel	Fermée	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les pourcentages de distribution des types de couvertures forestières peu variables; ➤ Les pourcentages de distribution des terrains anthropiques élevées à proximité du site minier
Lapa	En fermeture	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les pourcentages de distributions des types de couvertures forestières peu variables; ➤ Les pourcentages de distribution des terrains anthropiques élevées à proximité du site minier
Akassaba	Projet	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les pourcentages de distributions des types de couvertures forestières peu variables; ➤ Les pourcentages de distribution des terrains anthropiques très faibles à proximité du futur site minier
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les résultats pour les classes d'âge des forêts sont peu concluants 		

4.2 Comparaison du paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence

Pour comparer le paysage forestier à proximité de chaque site minier avec son environnement immédiat, la caractérisation du paysage forestier des sites de référence a été effectuée. Pour les sites de référence associés à chaque mine, les valeurs types de couvertures forestières, l'âge des forêts et les types de terrain ont été calculées selon, le maximum, le minimum, la moyenne et l'écart-type. Les résultats de distribution pour ces sites ont servi de référence pour l'analyse comparative.

4.2.1 Caractérisation du paysage forestier des sites de référence

Le tableau 6 présente les résultats pour les sites de référence. Pour les types de couvertures forestières, la classe des résineux a présenté des moyennes supérieures à celle des feuillus et des mixtes pour tous les sites témoins, exceptés les sites témoins de LaRonde et ceux de Lapa.

Concernant la classe d'âge des forêts, pour les sites de référence de Canadian Malartic et d'Akasaba, la moyenne de la classe d'âge 31-70 ans est plus élevée que la classe d'âge 0-30 ans et celle de 71 ans et plus, soit 32% pour le site de référence de Canadian Malartic (0-30 ans est égal à 22% ; 71 ans et plus est égal à 26%), et 37% pour le site de référence d'Akasaba (0-30 ans est égal à 19% ; 71 ans et plus est égal à 26%). Pour les sites de référence de LaRonde et de Joutel, la classe d'âge de 71 ans et plus possède la plus grande moyenne, soit 29% pour le site de référence de LaRonde et 67% pour celui de Joutel. Quant aux sites de Casa Berardi et de Lapa, c'est la classe d'âge 0-30 ans qui occupe une moyenne élevée par rapport aux classes 31-70 ans et 71 ans et plus.

En ce qui concerne les types de terrains anthropiques et dénudés humides, le tableau 5 montre que les moyennes pour la classe des terrains anthropiques sont nulles pour tous les sites témoins exceptés les sites témoins de LaRonde et de Lapa avec 1% chacun. Pour les terrains dénudés humides (DH), les sites de référence de Casa Berardi présentent une moyenne plus élevée que les autres sites.

Tableau 6 : Récapitulatif des types de couvertures forestières, âge des forêts et types de terrains pour les sites de référence.

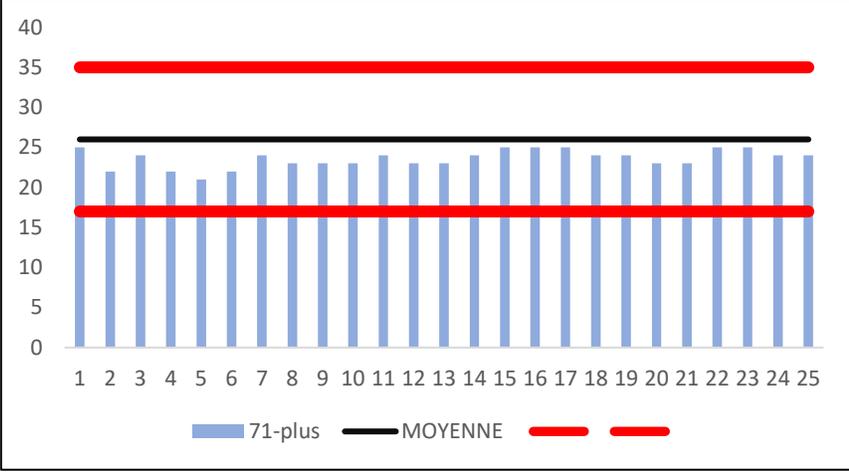
Sites témoins	Paramètres statistiques	Types de couvertures forestières (%)			Age des forêts (%)			Types de terrains (%)	
		Feuillus	Mixtes	Résineux	0-30 ans	31-70 ans	71 ans et plus	Anthropiques	Dénudés humides
Canadian Malartic	Maximum	16	32	88	33	53	44	0	26
	Minimum	0	4	38	9	13	19	0	0
	Moyenne	7	21	52	22	31	26	0	8
	Écart-type	5	11	18	9	17	9	0	9
LaRonde	Maximum	5	68	36	37	35	46	2	11
	Minimum	0	40	18	2	10	11	0	0
	Moyenne	3	52	27	19	22	29	1	4
	Écart-type	2	11	6	14	10	14	1	4
Casa Berardi	Maximum	0	18	65	54	2	31	0	81
	Minimum	0	0	10	0	0	4	0	7
	Moyenne	0	7	45	34	1	19	0	40
	Écart-type	0	6	21	24	1	11	0	28
Joutel	Maximum	26	28	54	1	0	89	0	35
	Minimum	1	1	28	0	0	41	0	1
	Moyenne	15	14	40	1	0	67	0	19
	Écart-type	10	10	11	0	0	16	0	13
Lapa	Maximum	82	41	40	46	35	40	6	6
	Minimum	17	1	0	14	1	10	0	0
	Moyenne	47	14	11	32	17	23	1	1
	Écart-type	25	14	16	13	14	10	2	2
Akasaba	Maximum	10	36	64	30	55	53	0	30
	Minimum	0	10	50	0	15	18	0	4
	Moyenne	6	21	54	19	36	26	0	14
	Écart-type	5	12	5	10	17	13	0	10

4.2.2 Paysage forestier à proximité des sites miniers versus le paysage des sites de référence.

En analysant les résultats, plusieurs cas se sont présentés, le tableau 6 dresse quelques exemples. Sur les différentes figures présentées dans le tableau 6, les barres verticales bleu (1-25) représentent les résultats de distributions de la variable d'un site tandis que la barre horizontale noire représente la moyenne de cette variable sur les sites de référence et les barres rouges constituent l'intervalle délimité par l'écart-type de la moyenne des sites de référence. Sur la figure A du tableau 6 par exemple, il a été constaté que 100% de la distribution sur toute la distance, est inférieure à l'intervalle délimité par l'écart-type de la moyenne des sites de référence pour les types de couvertures forestières (résineux dans l'exemple), et sur la figure B, 100% de la distribution est supérieure à l'intervalle délimité par l'écart-type de la moyenne des sites de référence. Sur la figure C, 100% de la distribution se trouve dans l'intervalle délimité par l'écart-type de la moyenne des sites de référence. Pour plus de détails sur les figures, voir l'annexe D.

Tableau 7 : Quelques exemples des cas de figures

Figures	Codes et couleurs	Résultat d'analyse
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <div style="float: left; width: 40px; text-align: center; border: 1px solid black; margin-right: 5px;">A</div> </div>	<p>OUI</p>	<p>Différent (100% des distributions inférieures à l'intervalle délimité par l'écart-type de la moyenne des sites de référence)</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <div style="float: left; width: 40px; text-align: center; border: 1px solid black; margin-right: 5px;">B</div> </div>	<p>OUI</p>	<p>Différent (100% des distributions sont supérieures à l'intervalle délimité par l'écart type de la moyenne des sites de référence)</p>

Figures	Codes et couleurs	Résultats d'analyse
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40px; float: left; margin-right: 10px;">C</div>  <p>Bar chart showing the distribution of '71-plus' across 25 sites. The y-axis ranges from 0 to 40. A black horizontal line represents the mean (MOYENNE) at approximately 26. Two red horizontal lines represent the standard deviation interval, with the upper one at approximately 35 and the lower one at approximately 17. All 25 bars for '71-plus' are within the red interval.</p>	NON	Pas différent (100% des distributions sur toute la distance se trouve dans l'intervalle délimité par l'écart type de la moyenne des sites de référence)

L'analyse effectuée présente des résultats sur la comparaison du paysage forestier à proximité des infrastructures minières et le paysage forestier des sites de référence. La figure 40 montre les résultats des analyses comparatives pour chaque site minier. Sur la base des huit variables retenues dans cette analyse, les résultats obtenus démontrent que chaque site minier est spécifique. Il a été observé pour le site minier de Canadian Malartic, deux variables catégorisées différentes à savoir : les forêts de résineux et les terrains anthropiques et six variables catégorisées pas différentes : les forêts feuillues, les forêts mixtes, les classes d'âge des forêts de 0-30 ans, 31-70 ans, 71 ans- plus, et les terrains dénudés humides. Pour LaRonde, trois variables ont été catégorisée différentes (les forêts feuillues, les forêts de résineux et les terrains anthropiques) et cinq variables catégorisées pas différentes (les forêts mixtes, les classes d'âge de 0-30 ans, 31-70 ans, 71 ans -plus et les terrains dénudés humides). Pour le site de Casa Berardi, la classe d'âge des forêts de 31-70 ans et la classe des terrains anthropiques ont été catégorisées différentes, les forêts feuillues, les forêts mixtes, les forêts de résineux, 0-30 ans, 71 ans -plus et les terrains dénudés humides ont été catégorisés pas différents. Pour Joutel, quatre variables ont été catégorisées différentes (les classes d'âge des forêts de 0-30 ans, 31-70 ans, 70 ans - plus et les terrains anthropiques) et quatre variables catégorisées pas différentes (les forêts de résineux, les forêts mixtes, les forêts feuillues et les terrains dénudés humides). Pour le site de Lapa trois variables ont été catégorisées différentes soit les forêts

feuillues, les forêts mixtes et les terrains anthropiques et cinq variables catégorisées pas différentes à savoir : les forêts de résineux, les classes d'âge de 0- 30 ans, 31-70 ans, 71 ans -plus et les terrains dénudés humides. Quant au site de Akasaba, les variables telles que les forêts feuillues, les forêts mixtes, les forêts de résineux, la classe d'âge de 31-70 ans et les terrains dénudés humides ont été catégorisées différentes et les classes d'âge des forêts de 0-30 ans, 71 ans-plus, terrains anthropiques ont été catégorisées pas différentes.

En comparant le paysage forestier à proximité des sites miniers et celui des sites de référence, il a été constaté que le niveau de différence des variables est particulier d'une mine à une autre.

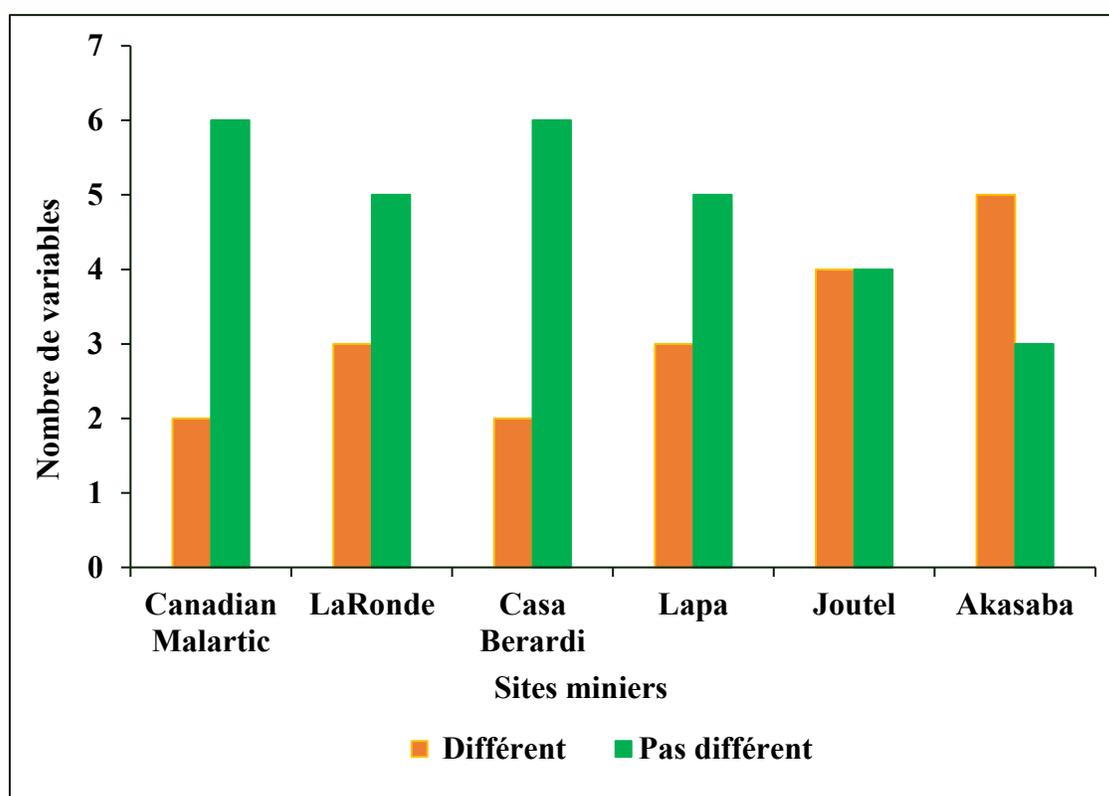


Figure 40 : Niveau de différence du paysage forestier à proximité des sites miniers

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats présentés au chapitre 4 suggèrent que les impacts des opérations minières sont observables sur le paysage forestier à l'extérieur de chaque site minier. Cependant, les répartitions spatiales de ces impacts sur la végétation arborée ne sont pas identiques pour tous les sites miniers. Elles varient en fonction du cycle de vie et de la typologie des mines qui ont fait l'objet de cette étude. L'ampleur des impacts a été évaluée grâce à la caractérisation de la zone de 250 m de distance à l'extérieur des sites miniers en utilisant les outils d'analyse spatiale de ArcGIS. La comparaison des résultats obtenus sur les caractérisations spatiales a permis d'établir les différences observées dans les paysages forestiers à proximité des sites miniers et ceux des sites de référence. Par ailleurs dans la littérature trouvée, il est mentionné que plusieurs phénomènes sont à la base des changements observés dans la composition des forêts boréales notamment les incendies de forêts (Baltzer et al., 2021), l'agriculture et l'étalement urbain ((Marchais et al., 2020)). Dans ce chapitre, le cycle de vie et la typologie des mines seront mis en relation pour expliquer les résultats obtenus.

5.1 Caractérisation du paysage forestier à proximité de chaque site minier.

Les opérations minières peuvent modifier la végétation arborée autour des sites miniers. Ces modifications s'expliquent par les changements des attributs du paysage forestier observés à proximité des sites miniers à travers les résultats obtenus. Les causes possibles des changements de la végétation autour des sites miniers peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs qui sont abordés ci-dessus.

5.1.1 Les sites miniers actifs

Les sites miniers actifs pendant le déroulement de ce projet de recherche sont Canadian Malartic, LaRonde et Casa Berardi. Généralement, en examinant les résultats trouvés sur la caractérisation du paysage forestier de la zone se trouvant à proximité des sites, il en ressort que les impacts hors site des activités minières sur le paysage forestier environnant sont observables au-delà des limites des infrastructures minières. En effet, pour le site minier Canadian Malartic par exemple, qui est une mine à ciel ouvert se trouvant dans une zone dominée par les résineux, les premiers 150 m ont montré de faibles pourcentages de distribution pour les résineux, tandis que les forêts mixtes étaient dominantes à proximité des installations minières (voir figure 22).

Le site minier de Casa Berardi, qui est une mine à opération mixte (ciel ouvert et souterraine), est quant à lui entourée par les résineux. Dans les premiers 70 m à partir des abords de installations, il a été constaté la présence de la classe des feuillus avec des faibles distribution (peu abondants). Néanmoins la classe des résineux a montré des pourcentages élevés pour toute la distance analysée (voir figure 28). Pour les infrastructures du site minier LaRonde en revanche, des variations peu considérables ont été constatées pour la classe des forêts mixtes qui est dominante à proximité des sites miniers (voir figure 25). Les résultats obtenus justifient l'affirmation selon laquelle le paysage forestier à proximité des mines en opération semble être affecté davantage par les impacts hors site que les mines fermées. Cette affirmation est aussi confirmée par (Mdaghri, 2008) qui a mentionné que la biodiversité est généralement menacée davantage pendant la phase d'exploitation de la ressource minérale .

Pour ce qui est de la classe d'âge des forêts pour les trois mines, les résultats trouvés sont peu concluants, puisqu'aucune différence significative n'a été trouvée entre les résultats. Toutefois, dans les zones se trouvant à proximité des installations minières de Canadian Malartic, par exemple, la classe d'âge 0-30 ans est peu répandue par rapport à la classe des vieilles forêts dont l'âge est de 71 ans et plus (voir figure 23). Ce faible pourcentage pourrait être expliqué par la présence des filtres écologiques (Guittouny, Marie & Buissière, 2021) qui agissent comme barrières pour le développement normal des jeunes plants. Ces filtres peuvent être soit physiques (granulométrie des matériaux, pente...), chimiques (acidité, alcalinité...) ou biologiques (absence de microbiomes, humus ...).

Quant à la classe des codes de terrains, les abords des infrastructures minières sont plus anthropisés, plus particulièrement pour la mine LaRonde (voir figure 27) et la mine Canadian Malartic (voir figure 24). En effet les pourcentages élevés de terrains anthropiques à proximité des sites miniers actifs est probablement la résultante des activités minières. Cette observation a aussi été faite lors des travaux de Chesworth en 2008. L'auteur a souligné que les paysages forestiers peuvent être modifiés par les activités d'exploitation minière et que les écosystèmes naturels qui s'y trouvent sont souvent remplacés par des substrats artificiels, appelés technosols. Les technosols sont définis par l'auteur comme étant des sols très pauvres en nutriments et qui sont souvent dépourvus d'organismes vivants (Chesworth, 2008).

5.1.2 Les mines fermées

Pour la mine Joutel qui est une ancienne mine à ciel ouvert et fermée depuis 1998, la description de la zone à proximité des infrastructures a révélé que la classe d'âge des jeunes forêts (0-30 ans) enregistrent des distributions considérables à proximité de l'ancien site minier (voir figure 32). Pour la classe des types de couvertures forestières, très peu de variations de la distribution ont été remarquées pour toute la zone analysée (voir figure 31). Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que la nature est en train de reprendre ses droits grâce aux processus naturels de la succession végétale primaire (Clements, 1916). En effet, lorsque les activités cessent sur un site minier, l'établissement des plantes sur des substrats pauvres en nutriments peut prendre plusieurs années. A ce propos, (Bradshaw, 2000) a mentionné dans ces travaux que les sols pauvres en nutriment qui sont les résultats des perturbations liées aux activités minières peuvent devenir biologiquement actifs grâce à la colonisation des organismes, en particulier des plantes, malgré les conditions de vie parfois défavorables. L'établissement des plantes sur des substrats pauvres en nutriments est un processus très lent. La première étape débute par l'établissement des espèces végétales pionnières qui créent ensuite des conditions favorables à l'établissement de nouvelles espèces végétales moins tolérantes. La figure 41 montre un schéma simplifié de la succession végétale primaire. Ces processus naturels peuvent prendre plusieurs centaines d'années pour développer une couverture végétale stable et diversifiée (Guittonny, Marie & Buisnière, 2021).

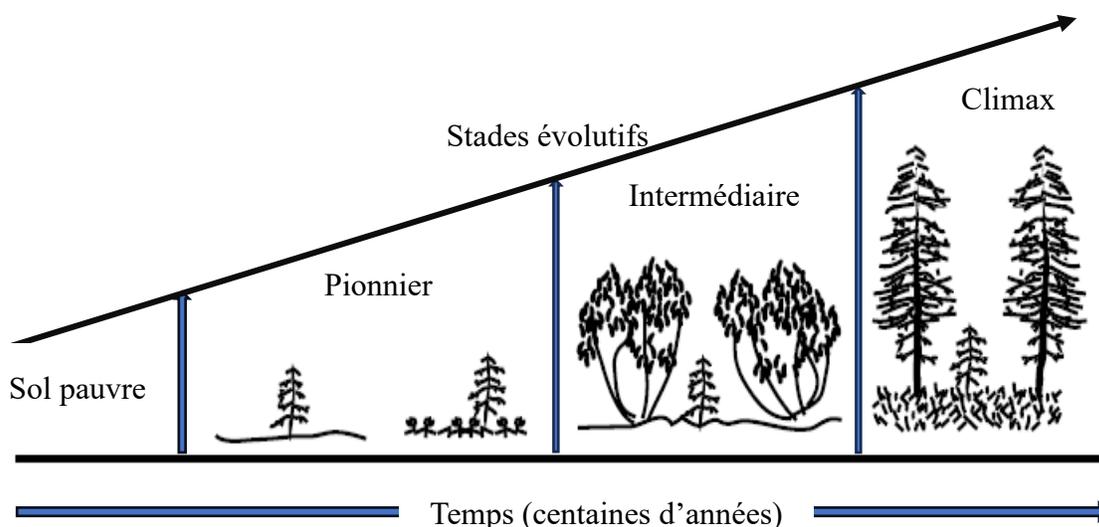


Figure 41 : Schéma simplifié de la succession végétale primaire modifié de (Chapin et al., 2012).

Pour le site de Lapa, peu de variations des pourcentages ont été notés pour les variables étudiées sur toute la distance analysée à l'exception de la classe des feuillus. Le pourcentage de distribution pour cette classe de types de couvertures est nul pour toute la distance analysée (250 m) à proximité du site minier. Cependant la classe des forêts mixtes est bien répandue avec des pourcentage élevés (voir figure 34). Lapa est un site qui a connu une deuxième phase d'exploitation très courte (environ 10 ans). Étant donné que ce site était une mine souterraine et que les installations de la mine LaRonde ont été utilisées pour le traitement du minerai extrait (parc à résidus, usine de traitement), peu de perturbations ont été causées à la surface. A ce jour, le processus de restauration entrepris est en cours sur le site, à savoir l'évaluation du succès de végétalisation (la composition de la communauté végétale et la productivité des espèces végétales pionnières établies sur le site). Pour revégétaliser un site minier, plusieurs approches peuvent être employées seules ou combinées (Guittonny, M. et al., 2022). Le choix des approches dépend de l'état de dégradation du site à revégétaliser.

5.1.3 Le projet minier

L'analyse de la distance de 250 m à proximité du site Akasaba a servi de guide pour comprendre et évaluer l'impact des infrastructures minières sur les végétations arborées autour des sites miniers, par le biais de la distribution spatiale des attributs des écosystèmes forestiers. Pour tous les paramètres considérés, l'analyse des résultats obtenus a montré de faibles variations des pourcentages de répartition sur toute la distance analysée. Pour la classe de types de terrains par exemple, les pourcentages de distribution pour les terrains anthropiques sont nuls (voir figure 39). Étant donné que les activités minières proprement dites n'ont pas encore débuté sur ce site, on pourrait alors déduire que les changements observés dans la description de la distance de 250 m à l'extérieur du futur site minier font partie de la variabilité des écosystèmes forestiers du milieu. Cette variabilité est considérée comme étant une partie intégrante de la diversité biologique naturelle comme l'a mentionnée (Hermitte, 1992). Cette notion très complexe et dynamique est définie par l'auteur comme étant la « variabilité des organismes vivants dans leurs relations avec le milieu où ils vivent ». Il est important aussi de signaler que diverses activités industrielles ont déjà été menées à côté du site Akasaba, ce qui pourrait avoir influencé le paysage forestier tout autour.

En résumé, les résultats globaux corroborent avec ceux de (Yin et al., 2022), qui ont conclu que les effets des impacts hors des opérations minières sont observables au de-là des limites des frontières des sites miniers. Les résultats obtenus des travaux antérieurs réalisés ont montré que la communauté du sous-bois de la forêt boréale autour des mines, est influencée par les impacts hors site des opérations minières sur une distance de 200 m à partir des abords des sites miniers.

Dans la présente étude, la description de la zone à l'extérieur des sites miniers a permis de mettre en évidence que les impacts qui se trouvent entre 10 m jusqu'à 150 m à partir des abords des infrastructures minières sont plus critiques, car l'ampleur de ces impacts semble considérablement affecter le paysage forestier.

5.2 Autres aspects influençant le paysage forestier autour des sites miniers.

Dans la littérature trouvée, les recherches de (Gray & He, 2009) et de (Mack et al., 2021) ont démontré qu'au cours des prochaines décennies la prédominance relative des arbres à feuilles caduques dans les forêts boréales devrait augmenter et que la composition des peuplements passerait des conifères aux feuillus. Selon les mêmes auteurs, ces changements prévus dans la composition de la forêt boréale sont la conséquence directe du réchauffement climatique qui modifie le régime des feux de forêt, qui deviennent plus fréquents. Dans les forêts boréales de l'Alaska par exemple, il a été constaté des changements d'espèces végétales, passant de la dominance des arbres de l'épicéa noir à croissance lente à des feuillus à croissance rapide causés par l'effet du brûlage intensif des sols organiques. Dans notre contexte, il est important de noter que les modifications observées à proximité des sites miniers pourraient accélérer les changements prévus dans la composition des forêts boréales. Cette accélération serait dû à l'action combinée des effets du réchauffement climatique et les impacts hors site des opérations minières.

Par ailleurs, d'autres recherches sont nécessaires afin de déterminer les conséquences de ces changements sur les services écosystémiques à court, moyen et long-terme. Sur la base des huit variables retenues, les résultats des analyses effectuées n'ont pas fourni d'informations concluantes concernant les types d'écosystèmes qui sont plus sensibles aux impacts hors site des opérations minières dans les régions de l'Abitibi et du nord du Québec.

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'industrie minière est un secteur crucial de l'économie du Canada, il constitue un contributeur important aux emplois et aux technologies de pointe. Par ailleurs, les impacts négatifs provoqués par cette activité affectent la biodiversité pendant tout le cycle de vie de la mine. Dans un cas général, la majorité des recherches examinent les impacts au niveau de l'emplacement immédiat des sites miniers. Par ailleurs, d'autres impacts causés directement ou indirectement par les opérations minières peuvent être localisés à l'extérieur des sites miniers.

6.1 Rappel des objectifs et conclusion de l'étude

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'ampleur des impacts des infrastructures minières sur les écosystèmes forestiers se trouvant à proximité de six sites miniers. La caractérisation du paysage forestier se trouvant à l'extérieur de chaque site minier a permis d'évaluer la répartition spatiale des impacts hors site des opérations minières sur les écosystèmes forestiers des régions de l'Abitibi et du nord du Québec.

La première partie des travaux de recherche a consisté à collecter toutes les informations disponibles sur les sites miniers mis à l'étude. Cette opération a été facilitée grâce aux fiches de collecte d'information élaborées à cet effet. À l'aide des outils d'analyse spatiale du logiciel ArcGIS et la carte écoforestière, les zones se trouvant à proximité des sites miniers ont été caractérisées. Les pourcentages de distributions pour les types de couverture (feuillus, mixtes et résineux), la classe d'âge des forêts (0-30 ans, 31-70 ans, et 71 ans et plus) et les types de terrains (terrains anthropisés et terrains dénudés humides) ont été extraits pour chaque zone et pour chaque mine. L'analyse effectuée sur les distributions des variables retenues montrent que les zones proches des infrastructures minières, plus particulièrement celles comprises entre 10 m et 150 m, sont plus affectées par les activités minières.

Les mines actives de Canadian Malartic et LaRonde ont présenté des pourcentages de distributions faibles pour les types de couvertures forestières aux abords des infrastructures minières. Pour le site de Joutel par exemple, malgré qu'il soit fermé, il a présenté des distributions élevées pour les terrains anthropiques à proximité des anciennes installations minières. Pour le projet minier Akasaba, peu de variations ont été constatées pour les types de couvertures forestières, la classe

d'âge des forêts et les types de terrains entre les paysages à proximité du site et les sites de référence.

En utilisant les outils d'analyse spatiale et la carte écoforestière, cette étude a contribué à l'amélioration des connaissances sur l'empreinte spatiale autour des sites miniers tout en considérant le type d'opération et l'étape du cycle minier.

6.2 Limites et recommandations de l'étude

Les approches méthodologiques utilisées dans cette étude ont permis de mettre en évidence l'altération de la végétation arborée autour des sites miniers. La caractérisation du paysage forestier a montré que la végétation qui se trouve à proximité des infrastructures minières sont majoritairement impactées par les effets hors sites des opérations minières. Par ailleurs, plusieurs autres sujets qui peuvent expliquer la cause des gradients observés à proximité des sites miniers n'ont pas été examinés en profondeur dans ces travaux de recherche, ce qui pourrait constituer une limite à cette étude. Ces sujets mériteraient des investigations approfondies et faire l'objet des projets de recherche séparés.

Dans la présente étude, l'approche employée pour caractériser le paysage forestier autour des mines n'a pas permis de déterminer l'implication des vents dominants. Pourtant les vents pourraient jouer un rôle déterminant dans le transport des particules de poussières lors des activités d'exploitation minière. Il faut aussi signaler que les anneaux créés pour la caractérisation du paysage forestier à proximité des infrastructures ont été réalisés sur une distance maximale de 250 m à partir des limites de chaque site minier, pourtant les précédentes études ont signaler que les effets pouvaient s'étendre sur une distance de 1000 m. Néanmoins, les résultats obtenus ont permis d'atteindre les objectifs de cette étude. Il serait souhaitable que des recherches soient effectuées en considérant cette fois ci, la taille des anneaux et une distance plus grande afin de voir les changements de la végétation à plus grande échelle. Il est aussi important de mentionner la limite temporelle de la base de données de la carte écoforestière utilisée dans cette étude. Pour les prochaines études, il serait important de se rappeler que les informations issues de cette carte pourraient changées à cause des mises à jour et du cycle de cartographie qui est d'environ 10 ans.

A la suite des conclusions ci-dessus, les recommandations suivantes ont été formulées :

- Réaliser des études complémentaires pour déterminer les conséquences des effets synergiques des changements dans la composition de la végétation dans la forêt boréale sur les services écosystémiques à court, moyen et long-terme dans les régions de l'Abitibi-Témiscaminque et du Nord du Québec;
- Effectuer des travaux de recherche pour déterminer le rôle des vents dominants dans la distribution spatiale des impacts hors site des opérations minières sur le paysage forestier environnant car les impacts pourraient être plus considérables vers le sens du vent;
- Conduire d'autres analyses multi-dates en utilisant les images satellitaires (télédétection) pour évaluer les changements opérés dans la composition de la forêt boréale dans le paysage forestier autour des mines avant, pendant et après les opérations; afin d'établir des prédictions sur les changements futurs;
- Réaliser des travaux de recherche pour définir les effets des impacts hors site des mines sur la répartition de la faune sauvage dans le paysage forestier autour des mines;
- Ériger une zone d'observation qui servira de zone tampon pour toutes les mines en opération. Cette zone aidera à la mise en place des programmes de surveillance du paysage forestier. Elle sera comprise entre les abords des installations minières jusqu'à 150 m (zone indiquée dans laquelle les impacts hors site sont plus marqués);
- Faire des reboisements en utilisant les espèces végétales indigènes (conifères en particulier) dans les zones tampons des mines en activité se trouvant dans des zones anciennement perturbées;
- Améliorer continuellement les techniques de gestion environnementale (poussière, DMA, DNC et autres) sur les sites miniers pour réduire au maximum les impacts hors sites des opérations minières;
- Prendre en compte les impacts hors site dans les processus d'évaluation environnementale des projets d'envergure.

7. RÉFÉRENCES

- Agnico Eagle Ltée. (2023). *Technical Report, LaRonde complexe, Québec, Canada* (NI43-101) [Rapport technique]. Agnico Eagle.
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and cases studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139-1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Alcott, J., Dallaire, D., & Belem, T. (2019, juin). *Pastefill Optimisation at Hecla Québec's Casa Berardi Mine* 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.
- André, P., Lanmafankpotin, G., Reveret, J. P., & Yonkeu, S. (2020). *L'évaluation des impacts sur l'environnement: Processus, acteurs et pratique pour un développement durable*. Presse internationales Polytechnique.
- Archambault-Giroux, J., De Los Rios, H., Blier, A., Roy, P., & McDonald, D. (2019). *Technical report for the casa berardi mine, northwestern Québec, Canada*. (NI43-101) [Rapport technique]. Hecla-Québec.
- Arseneault, B., Chevé, N., & Ethier, M.-P. (2021, juin 2021). *La restauration minière, un défi de taille à la mine Canadian Malartic*. Symposium of mines and the environment., Université du Québec en Abitibi Témiscamisque., <https://www.xcdsystem.com/cim/program/hJCAIxL/index.cfm?pgid=2198>
- Association minière du Canada. (2021). *La situation de l'industrie minière du Canada/ Faits & chiffres 2021* [Rapport]. Association minière du Canada. <https://mining.ca/fr/ressources/rapports/faits-et-chiffres-2021/>
- Association minière du Canada. (2023, 5 décembre 2023). *Industrie minière: Cycle de vie de la mine*. <https://intranet.amq-inc.com/lindustrie-miniére/industrie-miniére>
- Baltzer, J. L., Day, N. J., Walker, X. J., Greene, D., Mack, M. C., Alexander, H. D., . . . Boucher, Y. (2021). Increasing fire and the decline of fire adapted black spruce in the boreal forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(45), e2024872118. <https://doi.org/10.1073/pnas.202487211>

- Beaulieu, C. (2010). *Le Gisement Aurifère Péri-granitique de Canadian Malartic (Québec): Apport de la Modélisation à l'interprétation métallogénique* [Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal].
- Benzaazoua, M., Bussiére, B., Dagenais, A. M., & Archambault, M. (2004). Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environmental Geology*, 46, 1086-1101. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1113-1>
- Blowes, D. W., Jambor, J. L., & Hanton-Fong, C. J. (1997). Geochemical, mineralogical and microbiological characterization of a sulphide-bearing carbonate-rich gold-mine tailings impoundment, Joutel, Québec. *Elsevier Science*, 19. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00009-2)
- Bradshaw, A. (2000). The use of natural processes in reclamation—advantages and difficulties. *Landscape and urban planning*, 51(2-4), 89-100. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00099-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00099-2)
- Breton, M. N., Darveau, M., & Beaulieu, J. (2005). *Développement d'une méthode de classification automatisée des milieux humides et des milieux riverains en forêt boréale* (Q2005-1) [Rapport technique]. Canards Illimités. https://www.researchgate.net/publication/228591024_Developpement_d%27une_methode_de_classification_automatisee_des_milieux_humides_et_des_milieux_riverains_en_foret_boreale?enrichId=rgreq-e2afbbd135f2313b7e54f84a57d2d215-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIyODU5MTAyNDtBUzo5NzIxNzM5ODQ0ND A0NkAxNDAwMTg5ODQzMdIx&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf
- Brown, D. G., Riolo, R., Robinson, D. T., North, M., & Rand, W. (2005). Spatial process and data models: Toward integration of agent-based models and GIS. *Journal of Geographical Systems*, 7(1), 25-47. <https://doi.org/10.1007/s10109-005-0148-5>
- Chaire en éco-conseil. (2012). *L'industrie minière et le développement durable* [Document de travail]. Chaire de recherche et d'intervention en éco-conseil/ Université du Québec à Chicoutimi. Université du Québec à Chicoutimi.
- Chapin, F. S., Vitousek, P. M., & Matson, P. A. (2012). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer

- Charbonneau, P. (2014). *Analyse des pratiques de valorisation des rejets miniers* [Essais présenté au centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de l'obtention du grade de maîtrise, Université de Sherbrooke]. https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2014/Charbonneau_P_2014-07-10_.pdf
- Chevé, N. (2019). *Évaluation de la performance des géocomposites bentonitiques comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier*. [Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue]. Depositum. <http://depositum.uqat.ca/id/eprint/809/>
- Chrisman, N. (2014). Integrated land evaluation: Story of a track not taken. *ResearchGate*, p.8. Article scientifique. <https://www.researchgate.net/publication/287424572>
- Clements, F. E. (1916). *Plant succession: an analysis of the development of vegetation*. Carnegie institution of Washington.
- Crooks, A., Castle, C., & Batty, M. (2008). Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6), 417-430. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.004>
- Da Silva, L. (2013). *Les indicateurs de performances environnementales au service de l'efficacité: Le cas de la mine Canadian Malartic*. [Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement . Université de Sherbrooke].
- Dewan, A. M., & Yamaguchi, Y. (2009). Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*, 29(3), 390-401. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.12.005>
- Escarré, J., Lefèbre, C., Raboyeau, S., Dossantos, A., Gruber, W., Marel, J. C. C., . . . Oot, F. v. (2011). Heavy Metal Concentration Survey in Soils and Plants of the Les Malines Mining District (Southern France): Implications for Soil Restoration. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0547-1>
- Genivar. (2008). *Projet minier aurifère Canadian Malartic (AA106790)* [Rapport technique]. Genivar. http://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/Mines_Malartic/documents/PR3.1_partie3de3.pdf

- Gharehbaghi, K., & Scott-Young, C. (Octobre 2022 2018). *GIS as a vital tool for Environmental Impact Assessment and Mitigation* 2017 International Conference on Renewable Energy and Environment (ICREE 2017), Atlanta, USA. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/127/1/012009>
- Ghose, M. K., & Majee, S. R. (1998). Assesment of dust generation due to opencast coal mining- An indian case study. *Environmental monitoring and assessment*(61), 255–263. <https://doi.org/10.1023/A:1006127407401>
- Glenz, C., Massolo, A., Kuonen, D., & Schleapfer, R. (2001). A Wolf habitat suitability prediction study in Valais(Switzerland). *Landscape and urban planning*(55), 55-65.
- Goldex Mining, Entreprises Inc. (2001). *Final summary report on exploration activities for the poirier minier project: Poirier and Joutel townships* (NTS 32E/08) [Rapport technique]. Goldex Mining, Entreprises Inc.
- Gouvernement du Québec. (2023). *Carte écoforestière à jour*. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations>
- Gratton, P. (2019). *Guide de gestion sur les résidus miniers* (3,1) [Rapport technique]. Association Minière du Canada.
- Gray, L., & He, F. (2009). Spatial point-pattern analysis for detecting density-dependent competition in a boreal chronosequence of Alberta. *Forest Ecology and Management*, 259(1). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.048>
- Guittonny, M., & Buisnière, B. (2021). *Hard rock Mine réclamation from prédiction to mamangement of acide mine drainage : Révégétation of mine sites*. CRC Press.
- Guittonny, M., Cadet, C., & Hotton, G. (2022). *Synthèse sur la mise en végétation en contexte de restauration minière* [Rapport soumis à la Direction de la restauration des sites miniers du Ministère des Ressources naturelles et des Forêts par l'Unité de recherche et de service en technologie minérale de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue].

- Haque, M. I., & Basak, R. (2017). Land cover change detection using GIS and remote sensing techniques: A spatio-temporal study on Tanguar Haor, Sunamganj, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.003>
- Hermitte, M.-A. (1992). La convention sur la diversité biologique. *Annuaire français de droit international*, 88, 844-870. *Annuaire français de droit international*, volume 38,. <https://doi.org/10.3406/afdi.1992.3098>
- Hooper, D. U., F. S. Chapin III, J. J. Ewel, A. H., P. Inchausti, S. Lavorel, J. H. L., D. M. Lodge, M. L., . . . D. A. Wardle. (2005). Effets of biodiversity on écosystème functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological monographs/ Ecological society of America*. <https://doi.org/10.1890/04-0922>
- Houle, M. (2008). *Effets cumulés des activités forestière sur la sélection d'habitat du loup gris (Canis Lupus) en forêt boréale aménagée* [Mémoire de maîtrise, Université Laval].
- Institut de la statistique du Québec. (2021). <Production minérale du Québec en 2019> *Mines en chiffre* [Bulletin d'information]. Institut de la statistique du Québec. statistique.quebec.ca/fr/fichier/mines-en-chiffres-production-minerale-quebec-2019.pdf
- Kalonji-Kabambi, A., Bussiere, B., & Demers, I. (2021). In situ monitoring of an inclined cover made with mine waste materials to control water infiltration on a reactive waste rock dyke. *Journal of Contaminant Hydrology*, 239, 103790. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103790>
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205-241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Lewis, B., A., & Gallinger, R., D. (2006). *Poirier site réclamation programme* [Rapport technique]. R. A. limited.
- Li, L., Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., . . . Benzaazoua, M. (juin 2002). *La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement*. Canadian Society for Civil Engineering. Annual Conference. 30th, Québec, Montréal. <https://publications.polymtl.ca/26484/>

- Mack, M. C., Walker, X. J., Miller, S. N., Johnston, J. F., Eather, D., A., Melvin, A. M., & MÉLANIE, J. (2021). Carbon loss from boreal forest wildfires offset by increased dominance of deciduous trees. *Science*, 372(6539). <https://doi.org/10.1126/science.abf3903>
- Marchais, M., Arseneault, D., & Bergeron, Y. (2020). Composition changes in the boreal mixedwood forest of western Quebec since Euro-Canadian settlement. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 126. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00126>
- Marwa, K. (2020). *Évaluation des impacts du dénoyage des mines sur l'hydrogéochimie des tourbières et des aquifères superficiels* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue].
- Mdaghri, Z. A. (2008). *Intégration de la pensée cycle de vie aux études d'impacts: Cas du site minier Raglan* [Thèse présentée à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Philosophie doctor (Ph. D.) en Aménagement Université de Montréal]. papyrus.bib.umontreal.ca.
- Mercier-Langevin, F. (2011). LaRonde Extension – mine design at three kilometres. *Mining Technology*, 120(2), 95-104. <https://doi.org/10.1179/037178411X12942393517417>
- Mercier-Langevin, F., & Wilson, D. (2013). *Lapa Mine – ground control practices in extreme squeezing ground* Ground Support 2013: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Perth. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1304_06
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques. (2020). *Guide de caractérisation des résidus miniers et du minerai, Québec*. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/Industriel/secteur-minier/guide-caracterisation-minerai.pdf>
- Ministère des forêts de la faune et des parcs. (2004). *Portrait forestier des régions de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec*. Ministère des forêts de la faune et des parcs.
- Ministère des forêts de la faune et des parcs. (2015). *Norme de stratification écoforestière: Quatrième inventaire du Québec méridional*. Ministère des forêts de la faune et des parcs.

- Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. (2016). *Le secteur minier au Québec– Enjeux environnementaux et cadre normatif pour les rejets liquides* [Rapport]. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/milieu_ind/bilans/mines.htm
- Mishra, M., Santos, C. A. G., Nascimento, T., Dash, M. K., Silva, R. M. D., Kar, D., & Acharyya, T. (2022). Mining impacts on forest cover change in a tropical forest using remote sensing and spatial information from 2001-2019: A case study of Odisha (India). *J Environ Manage*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114067>
- Morten, F., Bernd, M., & Henning, S. H. (2013). Modelling land-use effects of future urbanization using cellular automata: An Eastern Danish case, *Environmental Modelling & Software*, Volume 50, Pages 1-11,. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.08.003>.
- Murray-Rust, D., Rieser, V., Robinson, D. T., Miličič, V., & Rounsevell, M. (2013). Agent-based modelling of land use dynamics and residential quality of life for future scenarios. *Environmental Modelling & Software*, 46, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.02.011>
- Nadeau, S., Rosa, E., Cloutier, V., Daigneault, R.-A., & Veillette, J. (2015). A GIS-based approach for supporting groundwater protection in eskers: Application to sand and gravel extraction activities in Abitibi-Témiscamingue, Quebec, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 535-549. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.05.015>
- Nadeau, S., Rosa, E., Cloutier, V., Mayappo, D., Paran, F., & Graillet, D. (2021). Spatial analysis approaches for the evaluation and protection of groundwater resources in large watersheds of the Canadian Shield. *Hydrogeology Journal*, 29(6), 2053-2075. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02367-3>
- Nascimento, H. E. M., & William, F. L. (2004). Biomass Dynamics in Amazonian Forest fragments. *National Institute for Amazonian Research*, 12. <https://doi.org/10.1890/01-6003>
- Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>
- Pérez-Vega, A., Mas, J.-F., & Ligmann-Zielinska, A. (2012). Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, 29(1), 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.011>

- Plante, B. (2010). *Évaluation des principaux facteurs d'influence sur la prédiction du drainage neutre contaminé*. [Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue]. <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/31>
- Poulard, F., Daupley, X., Didier C, P. Z., D'Hugues, P., Charles , N., Dupuy , J.-J., & Save , M. (2017). *Exploitation minière et traitement des minerais*. . Collection « La mine en France » Tome 6, 77. https://www.researchgate.net/publication/316273832_Tome_6_-_Exploitation_miniere_et_traitement_des_minerais/stats
- Qiang, Y., & Lam, N. S. (2015). Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata. *Environ Monit Assess*, 187(3), 57. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4298-8>
- Raiter, K. G., Possingham, H. P., Prober, S. M., & Hobbs, R. J. (2014). Under the radar: mitigating enigmatic ecological impacts. *Trends Ecol Evol*, 29(11), 635-644. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.09.003>
- Ratcliffe, J. L., Angela Creevy, Roxane Andersen, Evgeny Zarov, P. P. J. G., Mark A. Taggart, Yuri Mazei, A. N. T., James G. Rowson., & Elena D. Lapshina, R. J. P. (2017). Ecological and environmental transition across the forested-to-open bog ecotone in a west Siberian peatland,. *Science of The Total Environment*, 607–608, 816-828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.276>
- Ressources naturelles du Canada. (2023). *Données statistiques et analyses sur l'exploitation minière: Faits sur le minéraux et métaux du Canada*. <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/donnees-statistiques-et-analyses-sur-lexploitation-miniere/faits-mineraux-metaux/20603>
- Saint-Pierre, M., & Wigorski, J. (2009). *Rapport d'enquête à l'entreprise mines Agnico-Eagle Ltée(projet Lapa)*, (Rapport no. RAP0600628). CSST.
- Salgado, M., & Gilbert, M. (2013). *Agent Based Modelling*. In: Teo, T. (eds) *Handbook of Quantitative Methods for Educational Research* SensePublishers, Rotterdam.
- Saucier, J., P, Grondin, P., & Robitaille, A. (1998). Les régions écologiques du Québec méridional : un des éléments du système hiérarchique des classifications écologiques du territoire mis au point par le ministère des ressources naturelles. 13. <https://doi.org/330638545>

- Simard, M., Gaboury, D., Daigneault, R., & Mercier-Langevin, P. (2013). Multistage gold mineralization at the Lapa mine, Abitibi Subprovince: insights into auriferous hydrothermal and metasomatic processes in the Cadillac–Larder Lake Fault Zone. *Mineralium Deposita*, 48(7), 883-905. <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0466-3>
- Singh, S., Reddy, C. S., Pasha, S. V., Dutta, K., Saranya, K. R. L., & Satish, K. V. (2017). Modeling the spatial dynamics of deforestation and fragmentation using Multi-Layer Perceptron neural network and landscape fragmentation tool. *Ecological Engineering*, 99, 543-551. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.047>
- Sonter, L. J., Ali, S. H., & Watson, J. E. M. (2018). Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science. *Proc Biol Sci*, 285(1892). <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1926>
- Tardif-Drolet, M., Li, L., Pabst, T., Zagury, G. J., Mermillod-Blondin, R., & Genty., T. (2020). Revue de la réglementation sur la valorisation des résidus miniers hors site au Québec. *Environmental Reviews*. 28(1): 32-44. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0116>
- Tomlin, D. C. (2017). Cartographic Modeling. Dans *International Encyclopedia of Geography* (p. 1-6).
- Toubri, Y., Demers, I., Poirier, A., Pepin, G., Gosselin, M.-C., & Beier, N. (2021). Mergin 3D geological modeling and stochastic simulation to foster waste rock upstream management. *Journal of Geochemical Exploration*(224). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106739>
- Vincent, J.-S., and Hardy, L. 1977. “L'évolution et l'extension des lacs glaciaires Barlow et Ojibway en territoire québécois.” *Géographie Physique et Quaternaire*, Vol. 31: pp. 357–372. <https://doi.org/10.7202/1000283>
- Wang, S., Yang, Y., Luo, Y., & Rivera, A. (2013). Spatial and seasonal variation in evapotranspiration over canada's landmass. *Hydrology and Earth system sciences. European Geosciences Union*, 15. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3561-2013>
- Wieland, R., Mirschel, W., Nendel, C., & Specka, X. (2013). Dynamic fuzzy models in agroecosystem modeling. *Environmental Modelling & Software*, 46, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.02.006>
- WSP, & Mines Agnico Eagle. (2014). *Projet Akasaba Ouest: Description et avis de projet*. [Rapport de recherche].

- Yin, X., Boisvert, R., & Fenton, N. (2022). *Offsite effects of mining on the frequency and abundance of five understory plant species in western Québec (Canada)*, [Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi Témiscaminque]. Depositum. <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/1422>
- Yin, X., Martineau, C., & Fenton, N. J. (2023). How big is the footprint? Quantifying offsite effects of mines on boreal plant communities. *Global Ecology and Conservation*, 41, e02372. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02372>
- Zhuang, P., Murray B. McBride, Hanping Xia, Ningyu Li, & Zhian Li. (2009). Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China,. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.061>

8. ANNEXES

Annexe A : Fiche de collecte des informations sur les sites miniers

Cette fiche a été élaborée pour collecter les informations sur les sites miniers du projet.

Site Minier :

Caractérisation/ Infrastructures minières					
Superficie de la zone minière	Superficie du parc à résidus	Superficie des haldes stériles	Tonnage annuel 2019	Ressource minérale exploitée	Superficie du bassin de polissage

Stade évolutif de la mine

Stade	
Année début des opérations	
Durée de vie de la mine	

Typologie de la mine

Types de mines	Nombre de fosses	Dimension des fosses

Transport

Mode de transport du minerai	Distance

Rejet de concentrateur

Type de rejet de concentrateur	Volume annuel

Effluent final

Type	Débit mensuel	Milieu récepteur

Autres informations pertinentes

Annexe B : Caractérisation des six mines à l'étude, en Abitibi et au Nord-du-Québec.

La caractérisation des sites miniers a permis de collecter des informations appropriées pour chaque site. Pour déterminer ces différentes caractéristiques, une recherche documentaire suivie d'une synthèse des informations disponibles sur les sites miniers ont été réalisées. Les informations recherchées concernaient la typologie des sites (mine à ciel ouvert, mine souterraine ou les deux combinées), la superficie totale des installations minières de chaque site, le mode de transport utilisé sur les sites miniers, l'étape du cycle de vie de la mine et d'autres informations pertinentes (voir tableau de la caractérisation des mines). Afin d'organiser le travail, des fiches de collecte des données ont été élaborées pour chaque site minier (voir annexe A).

A l'issue des collectes d'informations effectuées sur les différents sites miniers, les informations trouvées ont été regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau B : Caractérisation des sites miniers

MINES	LARONDE	CANADIAN MALARTIC	LAPA	AKASABA	JOUTEL	CASA BERARDI
TYPES D'ECOSYSTEMES	47% d'arbre à feuilles caduques, 29% des forêts mixtes, 15% forêts de conifères et 7% zones humides (Yin et al., 2022).	42% forêts mixtes, 30% forêts de conifères, 16% forêts d'arbres à feuilles caduques et 10% zones humides (Yin et al., 2022).	42% forêts de conifères, 38% forêts mixtes, 10% forêts d'arbres à feuilles caduques et 8% zones humides (Yin et al., 2022).	52% forêts de conifères, 30% de zones humides, 14% forêts mixtes et 2% forêts d'arbres à feuilles caduques (Yin et al., 2022)	42% forêts de conifères, 30% zones humides, 23% forêts mixtes et 3% forêts d'arbres à feuilles caduques (Yin et al., 2022).	57% forêts de conifères, 28% zones humides, 10% forêts mixtes et 3% forêts d'arbres à feuilles caduques (Yin et al., 2022)
MINE SOUTERRAINE	X (Mercier-Langevin, 2011)	Non applicable	X (Mercier-Langevin & Wilson, 2013)		X	X (Alcott et al.)
MINE A CIEL OUVERT		X (Beaulieu, 2010)		X (Marwa, 2020)	X (Blowes et al., 1997)	X (Alcott et al.)
ETENDUE DE LA ZONE D'INFLUENCE	0-200 (Yin et al., 2022)	0-200 (Yin et al., 2022).		Non applicable		0-200 (Yin et al., 2022).
SUPERFICIE DE LA ZONE MINIERE	591 hectares	2083 hectares	11 hectares	82 hectares	215 hectares	422 hectares
SUPERVICIE DU PARC A RESIDUS	165 hectares (Mercier-Langevin, 2011), (Kalonji-Kabambi et al., 2021)	620 hectares (Arseneault et al., 2021)	non applicable (Mercier-Langevin & Wilson, 2013)	Non applicable	120 hectares (Benzaazoua et al., 2004)	21,86 ha
MINE EN ACTIVITE	X (Mercier-Langevin, 2011)	X (Beaulieu, 2010)				X
MINE EN FERMETURE			X (Yin et al., 2022).			
PROJET MINIER				X (Yin et al., 2022)		
ANCIENNE MINE RESTAURÉE					X (Yin et al., 2022).	

MINES	LARONDE	CANADIAN MALARTIC	LAPA	AKASABA	JOUTEL	CASA BERARDI
SUPERFICIES HALDES STERILES	Non identifié (Mercier-Langevin & Wilson, 2013)	370 hectares, (Arseneault et al., 2021), (Da Silva, 2013)		11 hectares(WSP & Mines Agnico Eagle, 2014)		
SUPERFICIE DES BASSINS		Polissage : 111 hectares Sédimentation :128 hectares (Arseneault et al., 2021)				
FOSES DE LA MINE	Non applicable	2 (Arseneault et al., 2021)		1 (16,8 hectares) (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014)		
MODE TRANSPORT DU MINERAI	Camions (Kalonji-Kabambi et al., 2021)	Camion (Arseneault et al., 2021)		Camions (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014)		
USINE DE TRAITEMENT DES MINERAIS	X	X (Da Silva, 2013)	Non applicable	Non applicable	X (Blowes et al., 1997)	X
REJET DE CONCENTRATEUR	Résidus épaisiss(Kalonji-Kabambi et al., 2021)	Résidus minier épaisiss (63 à 65% solide) (Arseneault et al., 2021)		Rejet épaisiss		
TONNAGE ANNUEL		20M t / an (Arseneault et al., 2021)	100.000 Ounce en 2013(Simard et al., 2013)	OR=25 000 Ounce CUIVRE=100 000 ounces (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014)	385 000t en 1998 (Blowes et al., 1997)	
TYPE DE RESSOURCE	OR, CUIVRE, ARGENT, ZINC ((Mercier-Langevin & Wilson, 2013), (Kalonji-Kabambi et al., 2021)	OR , ARGENT (Beaulieu, 2010)	OR ((Simard et al., 2013)	OR (Marwa, 2020) et CUIVRE (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014)	OR(Simard et al., 2013)	OR ((Alcott et al.))

Annexe C : Modèle conceptuel de mine en Abitibi et au nord du Québec

Étant donné que toutes les mines présentent des caractéristiques différentes, un modèle conceptuel de mine qui représenterait le site minier type a été défini. Le paramètre 2 (qui est la superficie de la zone minière) a été utilisé comme référence pour la taille des sites témoins.

Sélection des paramètres correspondants au site minier type et justification

Paramètre 1 : Typologie

Dans les premières phases d'un projet minier, il est nécessaire de définir le type de mine (ciel ouvert ou souterraine). Ce choix dépend majoritairement des propriétés géologiques mais aussi de l'emplacement de la ressource minérale (proche de la surface ou en profondeur). Le tableau ci-dessous dresse la liste des mines mises à l'étude. Dans le modèle conceptuel de mine type, il est important de considérer cette caractéristique.

Tableau C.1 : Typologie des mines

Nombre total	Mine à ciel ouvert	Mine souterraine	Souterraine + ciel ouvert
6	2	2	2

Une représentation de mine avec les deux typologies (ciel ouvert et souterraine) a été privilégiée ayant au moins une fosse de minage. Ce choix est justifié par le fait que, généralement les promoteurs miniers peuvent commencer avec une mine à ciel ouvert, mais par la suite pour maximiser leur rendement, aller chercher en profondeur la ressource minérale; c'est les cas par exemple à Canadian Malartic (Arseneault et al, 2021). D'autres par contre peuvent faire l'inverse, comme c'est le cas de la mine Casa Berardi (Alcott et al, 2019).

Paramètre 2 : Superficie de la zone minière

Cette superficie permet de délimiter la zone où s'effectue les opérations minières. Pour avoir une représentation qui prend en compte les caractéristiques des mines à l'étude, la médiane a été utilisée comme base pour déterminer la taille de la mine type (sites témoins). Ainsi le tableau ci-dessous présente les superficies connues des zones minières par ordre croissant.

Tableau C.2 : Superficies des zones minières

Ordre	Superficie en hectares	Mine
1	11	Lapa
2	82	Akasaba
3	215	Joutel
4	422	Casa Berardi
5	591	LaRonde
6	2 083	Canadian Malartic

La taille de la mine type est la suivante :

$$(215 \text{ ha} + 422 \text{ ha}) / 2 = 318 \text{ ha}$$

Paramètre 3 : Fosse de minage

La représentation de ce paramètre dans le modèle est indispensable compte tenu du paramètre 1 déjà mentionné ci haut. La fosse de minage est une fosse qui est creusée en banc avec des dimensions très variables d'une mine à une autre.

Dans la mine type, une seule fosse à ciel ouvert est considérée car pour les trois mines à ciel ouvert, deux ont une seule fosse et une mine a 2 fosses avec pour superficie **16,8 hectares**. Ceci correspond à la superficie de la fosse prévue de Akasaba (WSP & Mines Agnico Eagle, 2014).

Paramètre 4 : Superficie du parc à résidus

Les parcs à résidus sont des aires d'entreposages des rejets de concentrateurs provenant du traitement du minerai à l'usine. Cette infrastructure est un ensemble de structures d'ingénierie et composantes mis en commun pour gérer les résidus miniers solides et l'eau qui s'y trouve. Comme mentionné dans le rapport de (Gratton, 2019), la gestion efficace des résidus miniers et du parc qui doit les recevoir est un aspect clé des opérations minières. Le principal enjeu lié à cette infrastructure est la rupture des digues (stabilité physique) qui peut causer des dégâts à l'environnement et aux populations environnantes.

Dans le modèle conceptuel de mine type, le même concept des médianes a été utilisé. Le tableau ci-dessous présente les superficies connues des parcs à résidus des différentes mines à l'étude par ordre croissant.

Tableau C.3 : Superficies des parcs à résidus

Ordre	Superficies en hectares	Mine
1	120	Joutel
2	165	LaRonde
3	620	Canadian Malartic

En utilisant la formule de la médiane et en se basant sur le tableau ci-dessus, la superficie médiane est 165 hectares, celle du parc à résidus de la mine LaRonde.

Paramètre 5 : Superficies des haldes de roches stériles

Une halde à stériles est définie comme étant un amoncellement formé dans une mine par les roches stériles issues de l'extraction du minerai. Dans les mines, ce sont des empilements de roches qui ont souvent des structures hétérogènes de grandes dimensions. Ces roches peuvent en outre contenir des minéraux réactifs en contact avec l'air et l'eau produisent du drainage minier acide (DMA), ou du drainage neutre contaminé (DNC) (Nordstrom et al., 2015).

Dans le modèle conceptuel, la représentation de la halde à stérile est essentielle car elle est présente dans toutes les installations minières en activité comme le montre le tableau 5. La configuration de cette composante est différente d'une mine à une autre. Par exemple à MCM, sa surface d'entreposage est composée de plusieurs empilements compte tenu de leur composition (faible teneur, forte teneur, dépôt meubles) (Arseneault et al., 2021) . Étant donné que très peu d'information sont disponibles sur ces superficies, la moitié du parc à résidus sélectionné plus haut a été choisie : $165/2 = 82,5$ hectares. Ce choix est basé sur l'observation faite à la Mine Canadian Malartic et pour les autres sites miniers peu d'information ont été trouvées sur les dimensions de cette composante.

Paramètre 6 : Superficie des bassins de traitement des eaux minières

L'industrie minière utilise dans ses activités une quantité importante d'eau dont la gestion adéquate est primordiale tout au long du cycle de vie de la mine. Les eaux provenant des activités minières peuvent contenir des contaminants comme les métaux, des particules fines solides en suspension ou dissoutes, les cyanures, dans certains cas avec de pH acides. C'est pourquoi elles sont acheminées dans des bassins pour le traitement avant d'être rejetées dans l'environnement. Ces

bassins de traitement des eaux minières sont des infrastructures de confinement qui permettent le recyclage de l'eau dans les opérations minières d'une part, et d'autre part, pour traiter l'eau, la débarrasser des contaminants avant son rejet à l'effluent final. La configuration des bassins de traitement d'eau est très variable d'une mine à une autre, cependant elle est constituée généralement d'au moins de deux compartiments : un grand bassin de sédimentation et un bassin de polissage (Arseneault et al., 2021).

Pour la superficie de cette composante, le tiers du parc à résidus a été utilisé, semblable à la situation remarquée pour la mine Canadian Malartic : $165/3= 55$ hectares.

Paramètre 7 : Superficie de l'usine de traitement du minerai

Le minerai, après extraction dans les chantiers miniers, subit plusieurs processus de traitement physiques et/ou chimiques permettant de récupérer les métaux précieux ou des minéraux de valeur sous forme de concentré (Poulard et al., 2017; Wang et al., 2013). Ces processus de traitement se déroulent dans des installations conçues à cet effet dont la configuration dépend généralement du type de minerai qui y est traité. Sur la figure C ci-dessous, nous remarquons que toutes les mines à l'étude exploitent l'or, et quelques-unes exploitent en plus d'autres métaux.

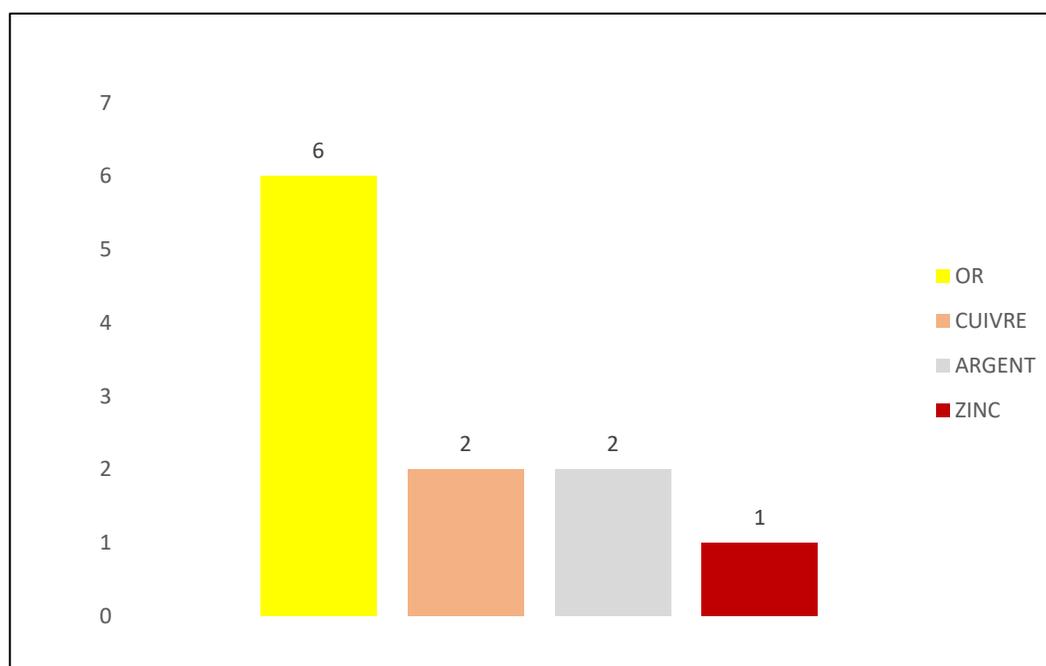


Figure C : Principaux types de minéraux exploités par les sites miniers

Dans notre modèle conceptuel, la représentation de ce paramètre sera considérée dans la superficie de la zone minière parce que sa proportion n'est pas très grande par rapport aux autres composantes des installations minières.

Paramètre 8 : Mode de transport

Le transport du minerai de la fosse de minage vers les aires d'entreposage est assuré par les camions dans l'industrie minière. Ce paramètre est une composante importante dans les opérations minières car il garantit l'approvisionnement de l'usine de traitement. Par ailleurs, il constitue aussi une source d'émission diffuse de la poussière qui est considéré comme un problème majeur des industries minières (Genivar, 2008) .

A ce jour, plusieurs moyens sont déployés afin d'atténuer les soulèvements de poussière pendant les opérations minières dont les arrosages réguliers et l'utilisation des abat-poussières pendant les périodes de séchage.

Le tableau C.4 résume les paramètres qui décrivent le modèle conceptuel de mine dans la région de l'Abitibi et du nord du Canada.

Tableau C.4 : Récapitulatif des paramètres pour le modèle conceptuel de mine.

Paramètres	Propriétés
Typologie	Ciel ouvert + souterraine
Superficie zone minière	318 hectares
Fosse de minage	16,8 hectares
Superficie parc à résidus	165 hectares
Superficie des haldes	82,5 hectares
Superficie bassin de traitement des eaux minières	55 hectares
Mode de transport du minerai	Camions

Annexe D : Figures montrant la différence entre le paysage à proximité des sites miniers et celui des sites témoins.

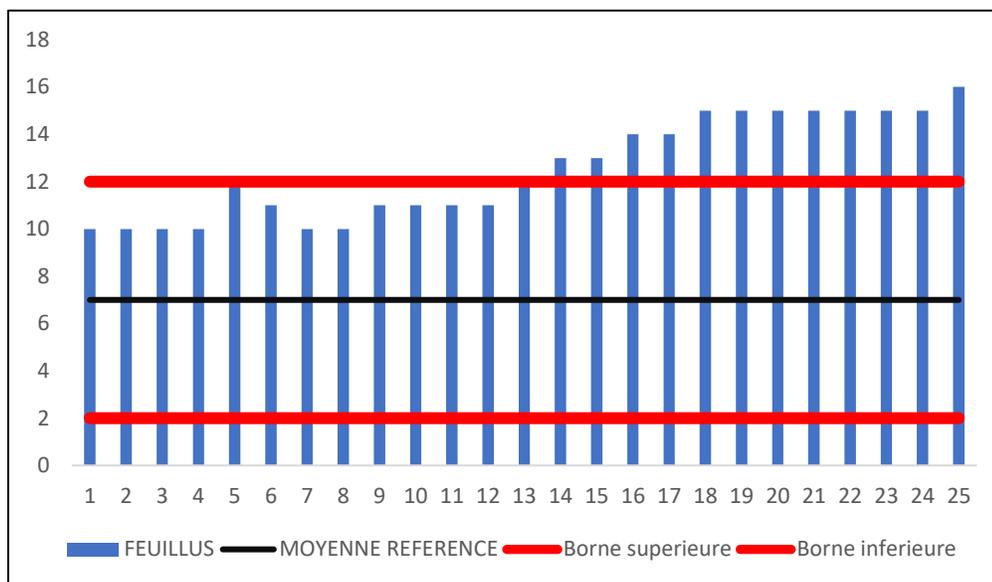


Figure D.1 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (feuillus).

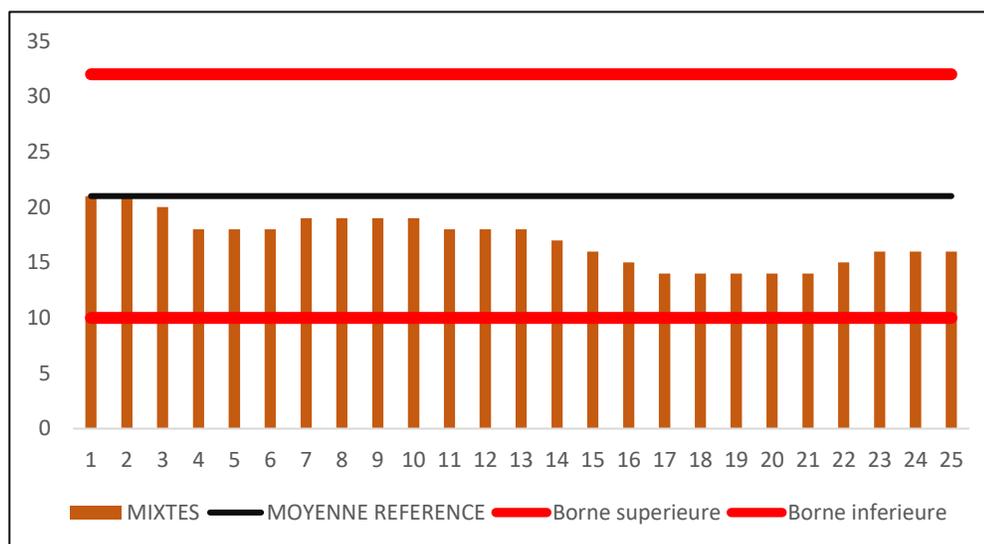


Figure D.2 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (mixtes).

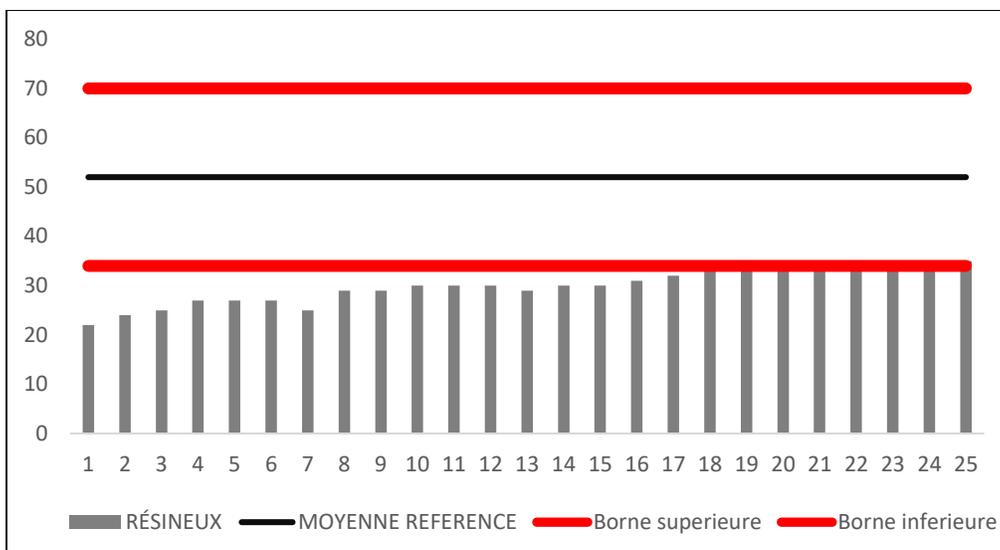


Figure D.3 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (résineux).

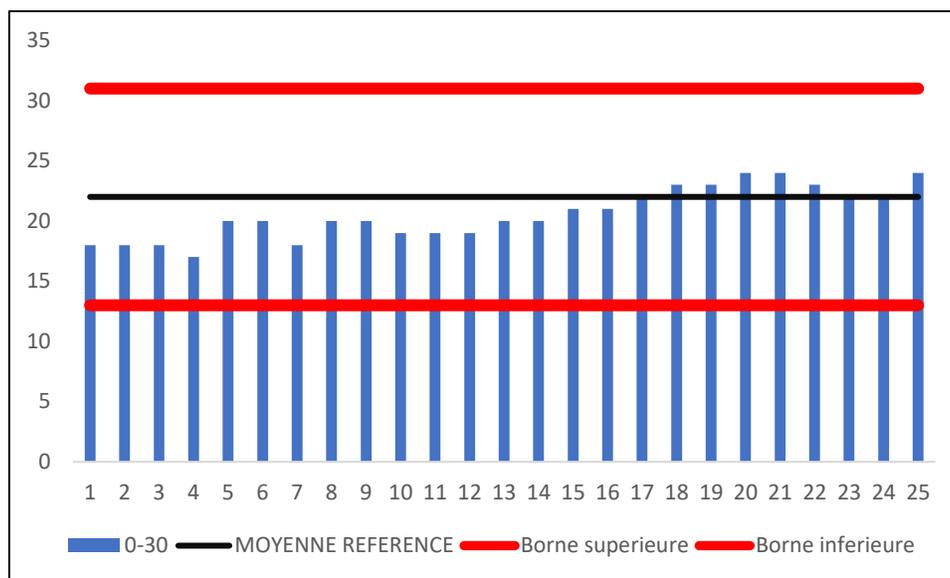


Figure D.4 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (0-30 ans).

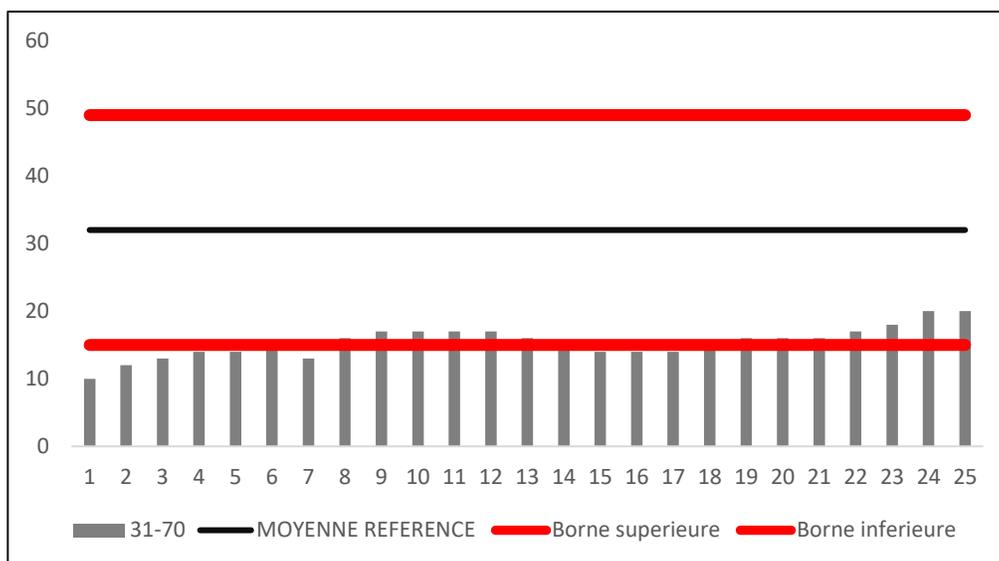


Figure D.5 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (31-70 ans).

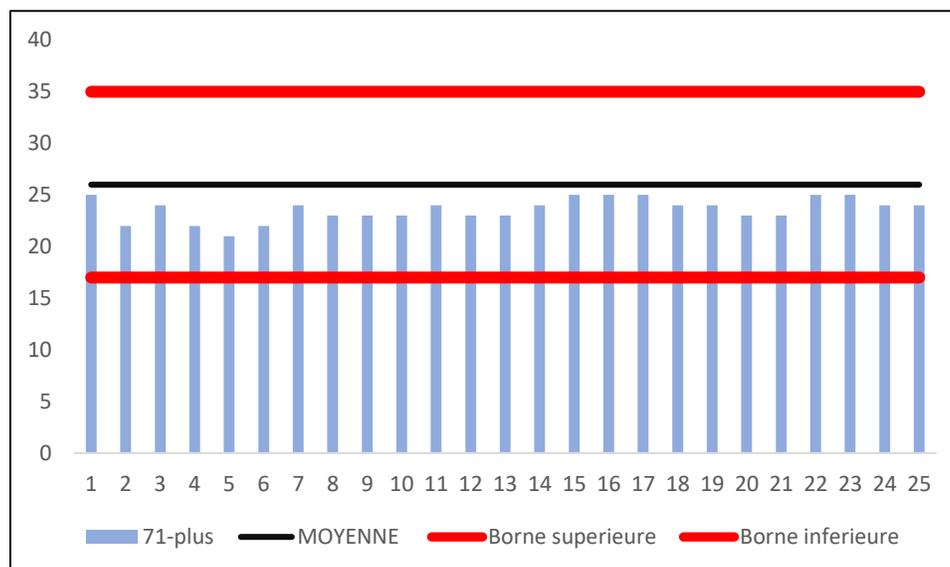


Figure D.6 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (71 ans et plus)

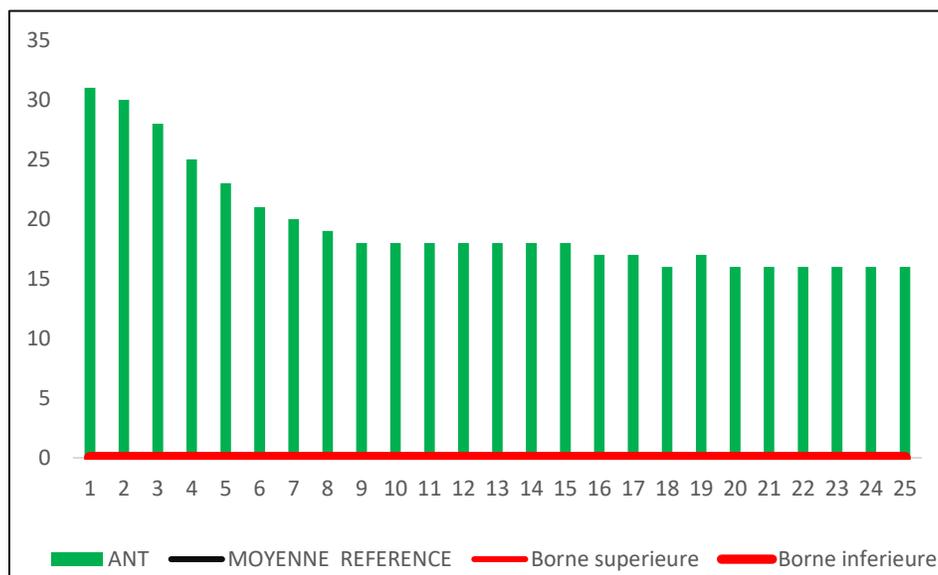


Figure D.7 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (Anthropiques)

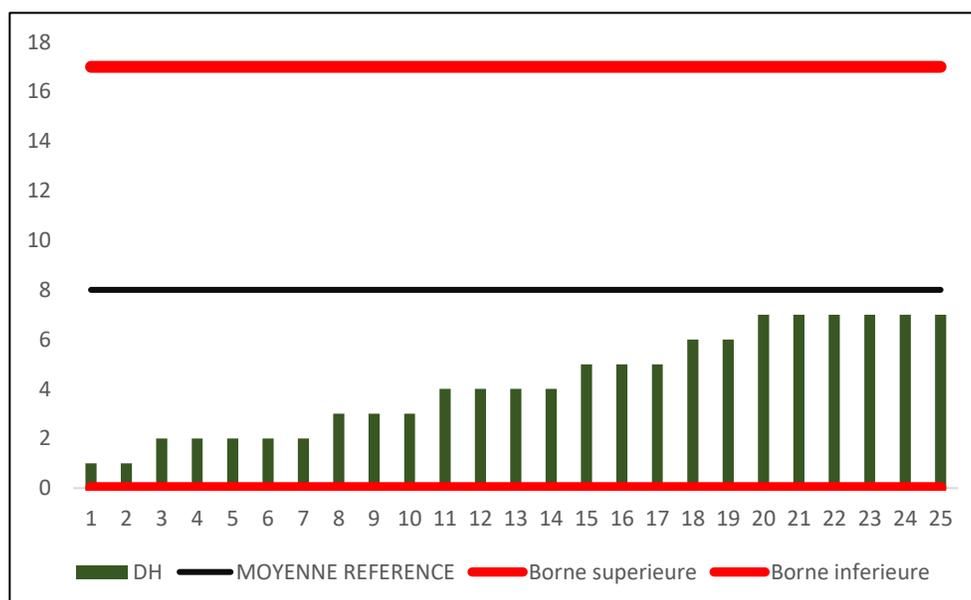


Figure D.8 : Comparaison entre le paysage à proximité de Canadian Malartic et celui des sites de référence (dénudés humides)

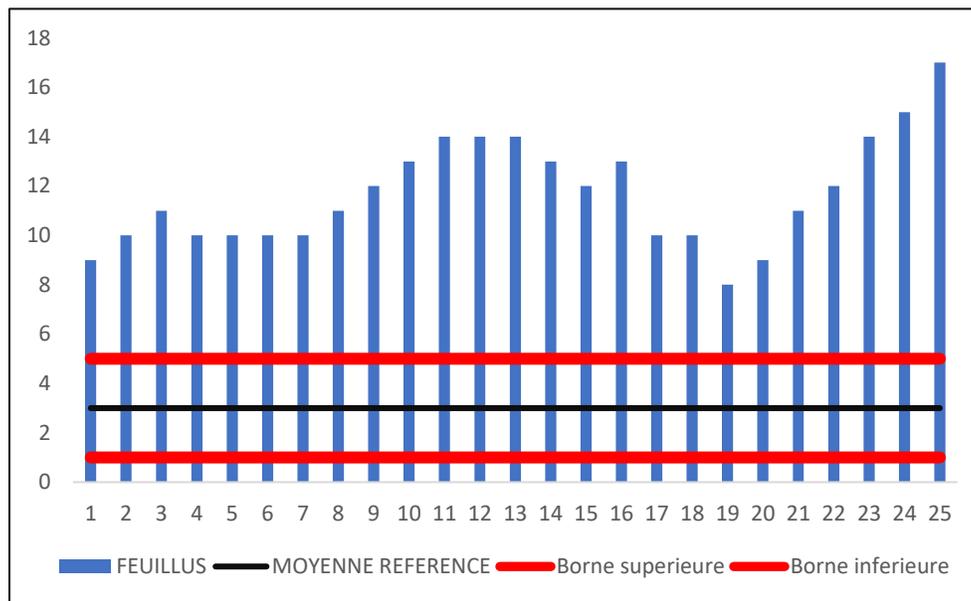


Figure D.9 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites de référence (feuillus)

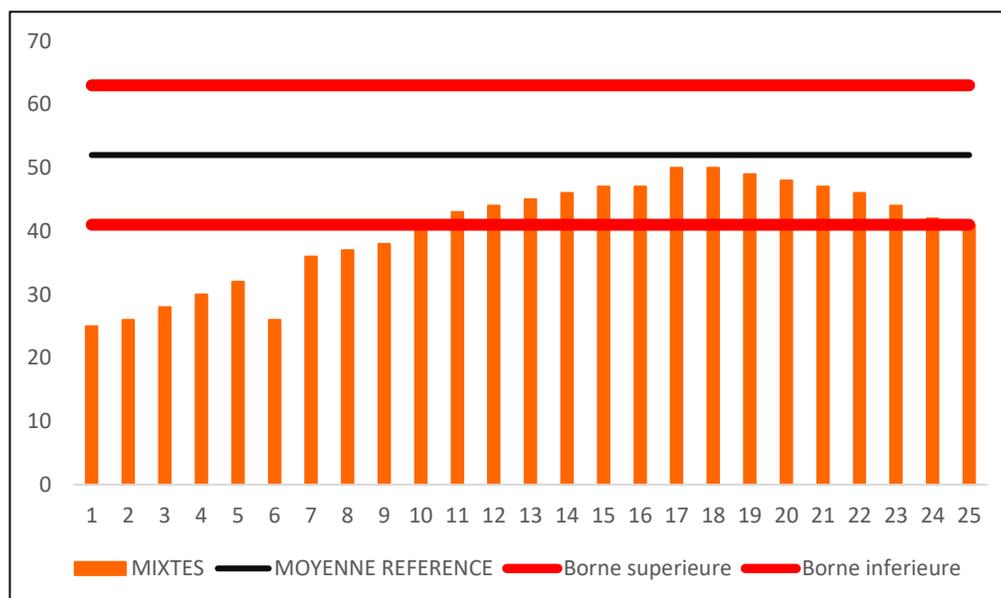


Figure D.10 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites de référence (mixtes)

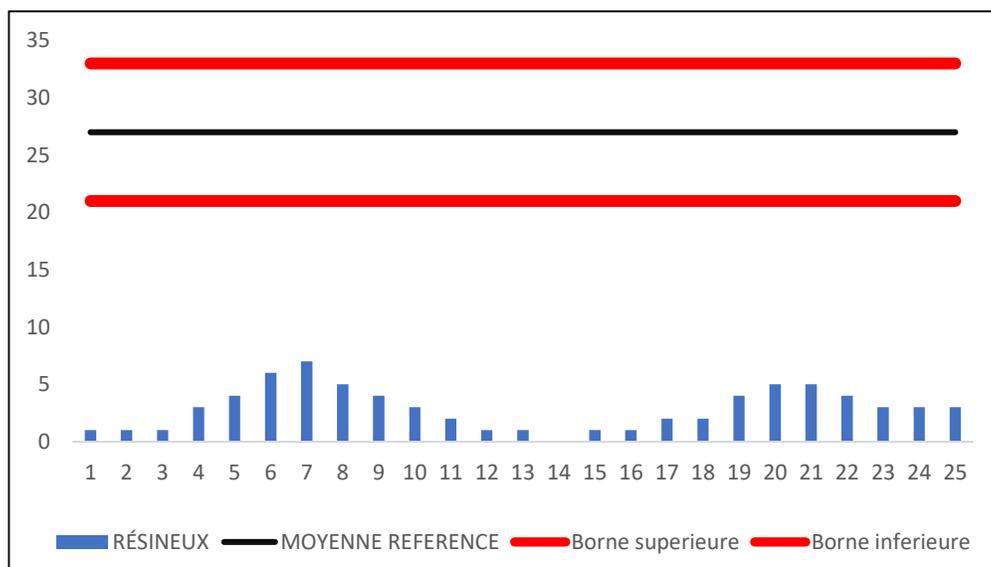


Figure D.11 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites de référence (résineux)

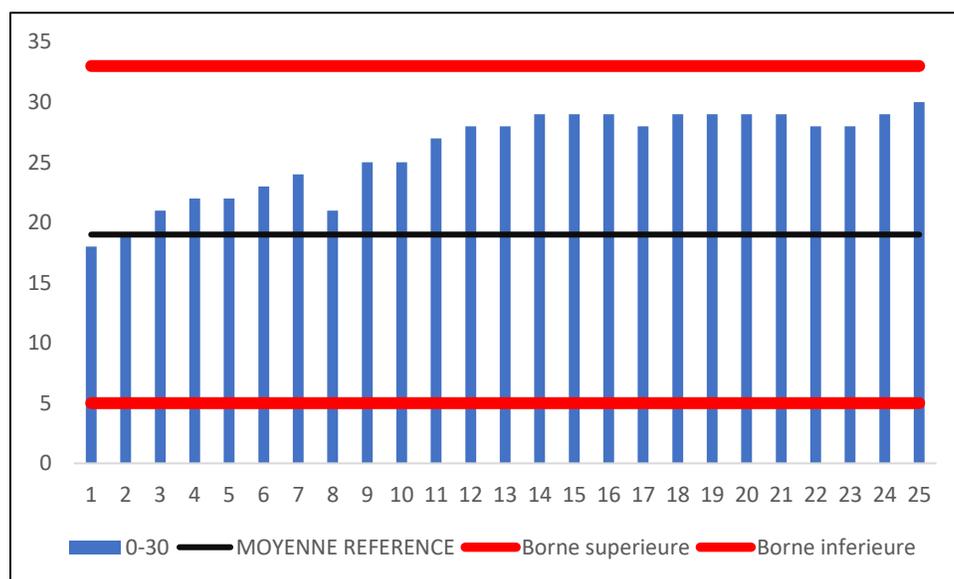


Figure D.12 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites de référence (0-30 ans)

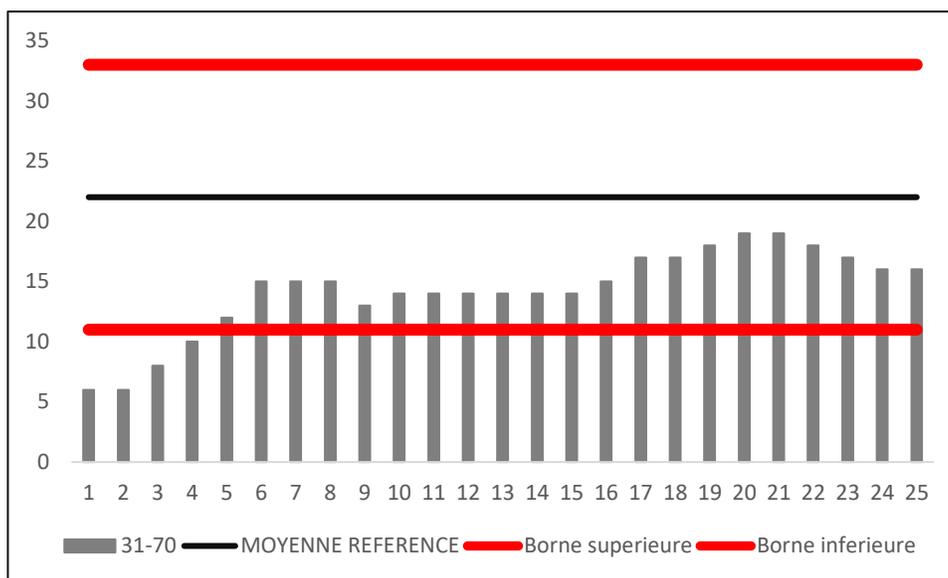


Figure D.13 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites de référence (31-70 ans)

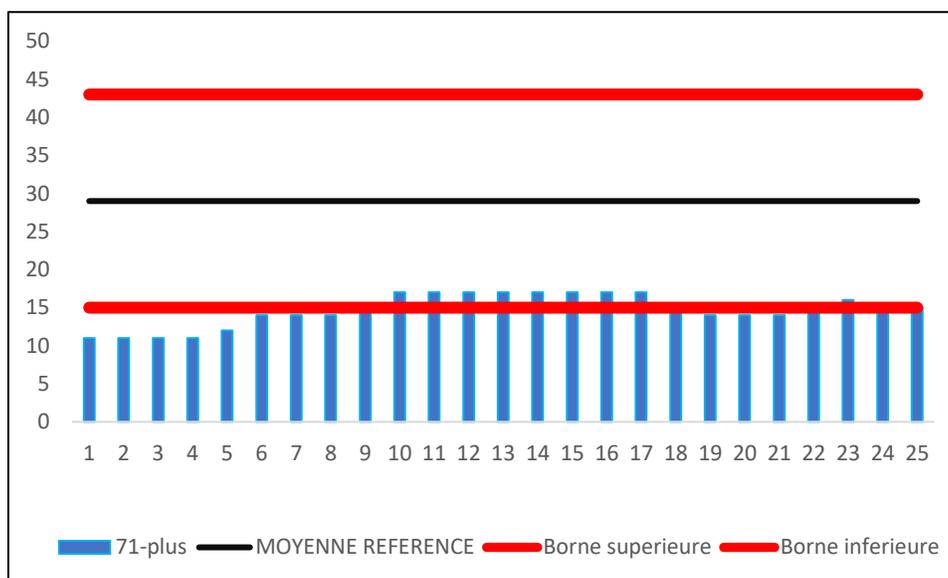


Figure D.14 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites de référence (71 ans et plus)

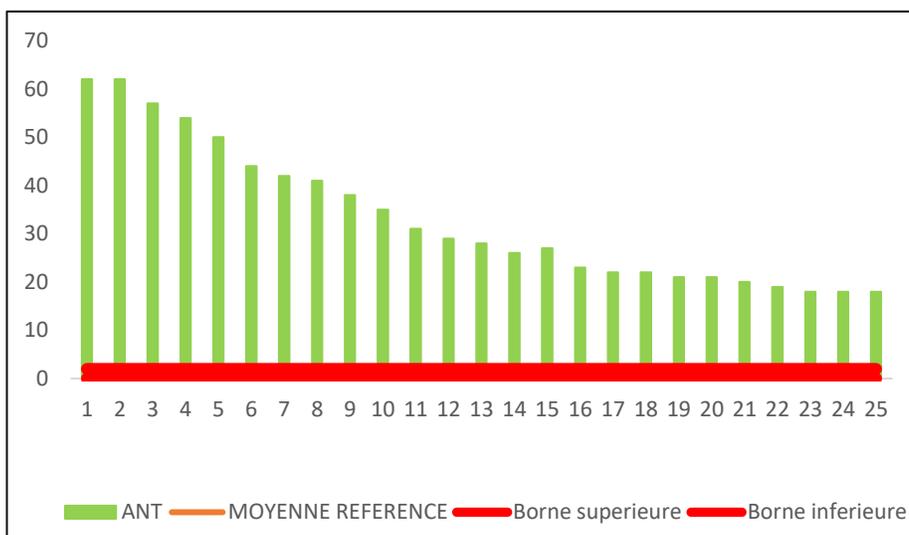


Figure D.15 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites témoins (anthropiques)

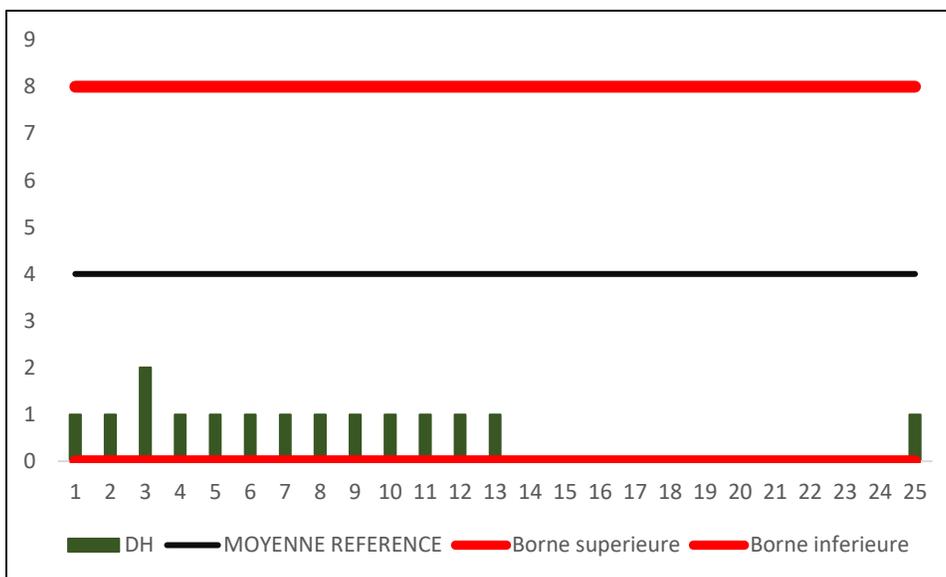


Figure D.16 : Comparaison entre le paysage à proximité de LaRonde et celui des sites de référence (dénudés humides)

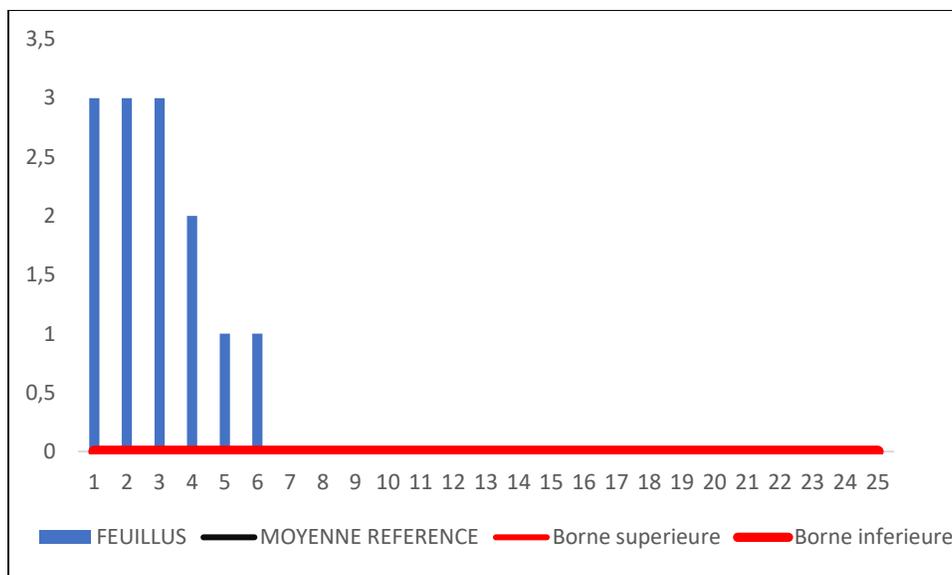


Figure D.17 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (feuillus)

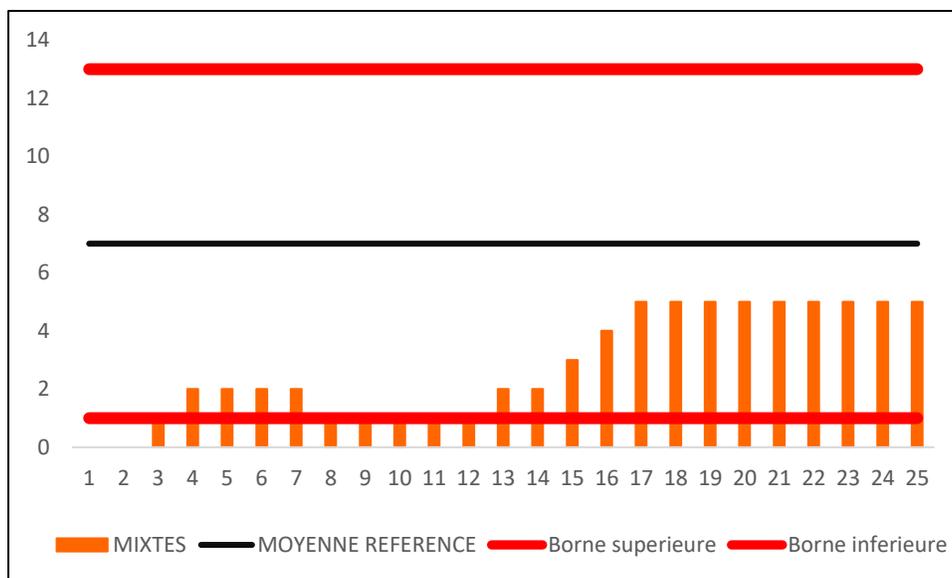


Figure D.18 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (mixtes)

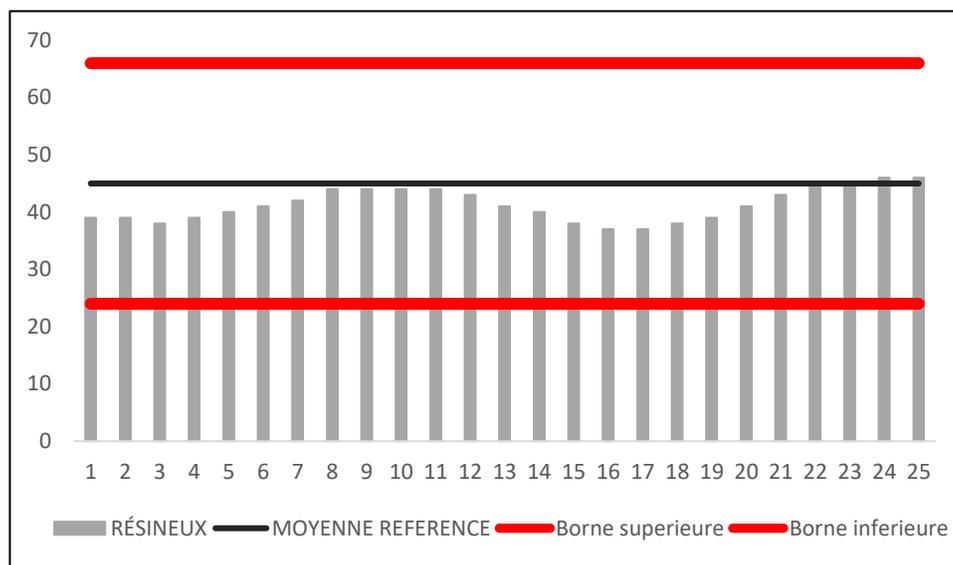


Figure D.19 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (résineux)

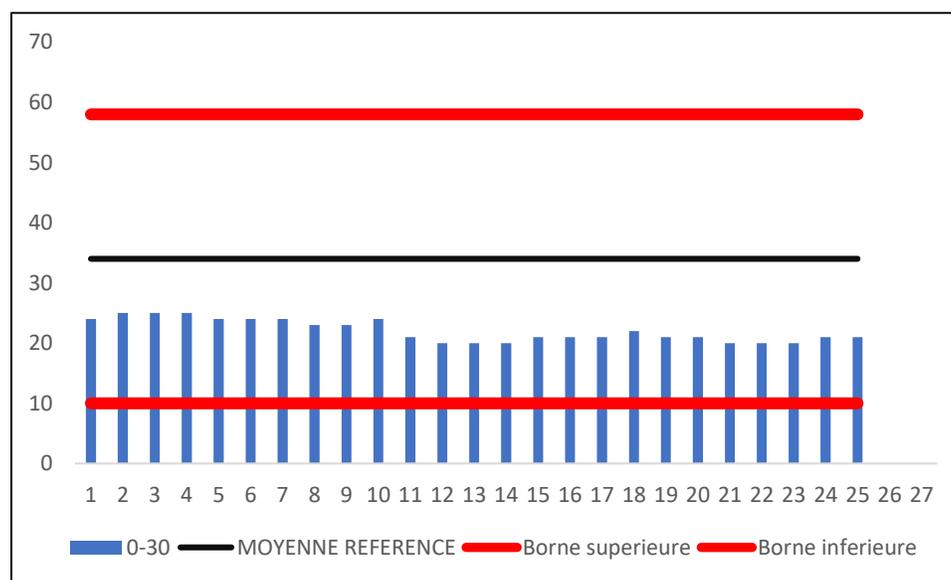


Figure D.20 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (0-30 ans)

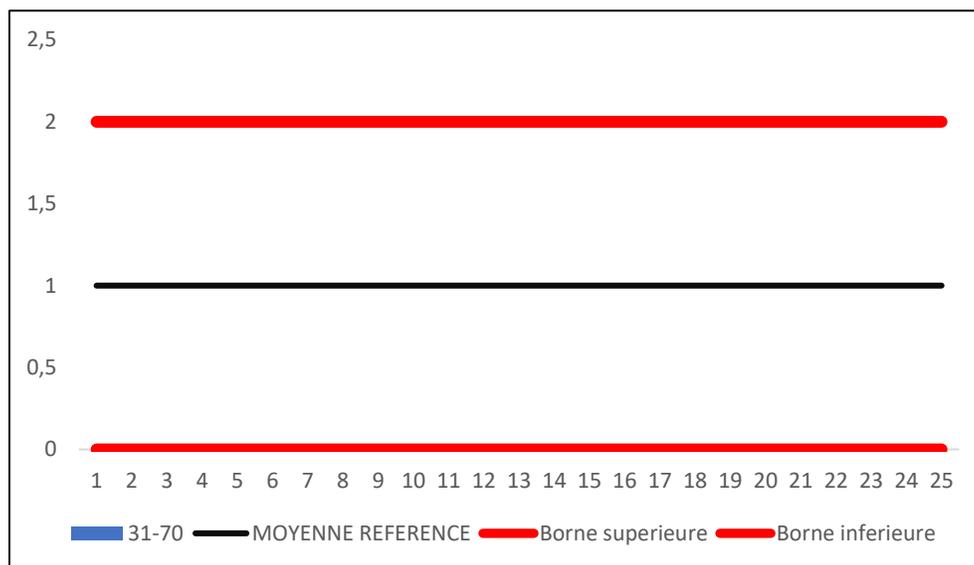


Figure D.21 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (31-70 ans)

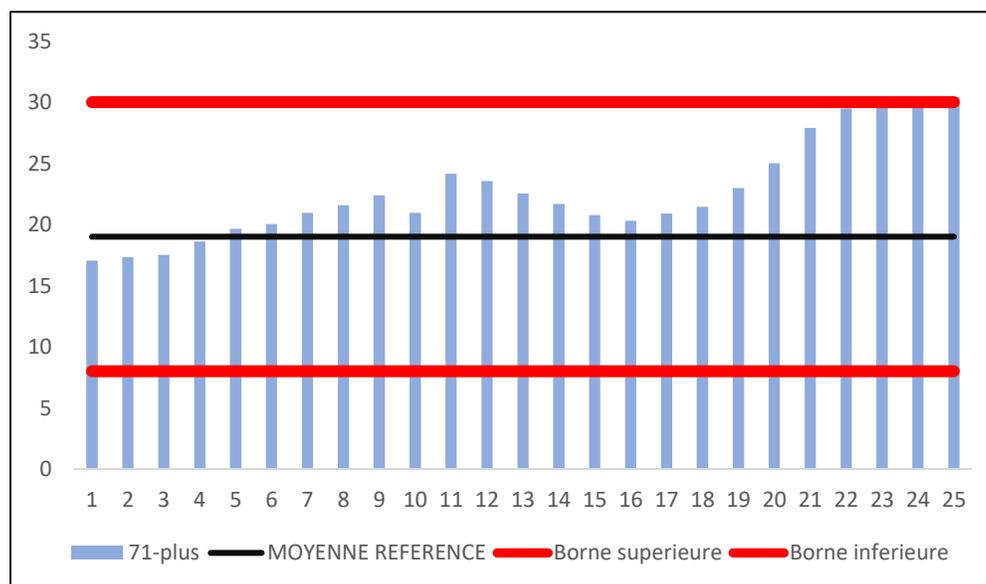


Figure D.22 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (71 ans et plus)

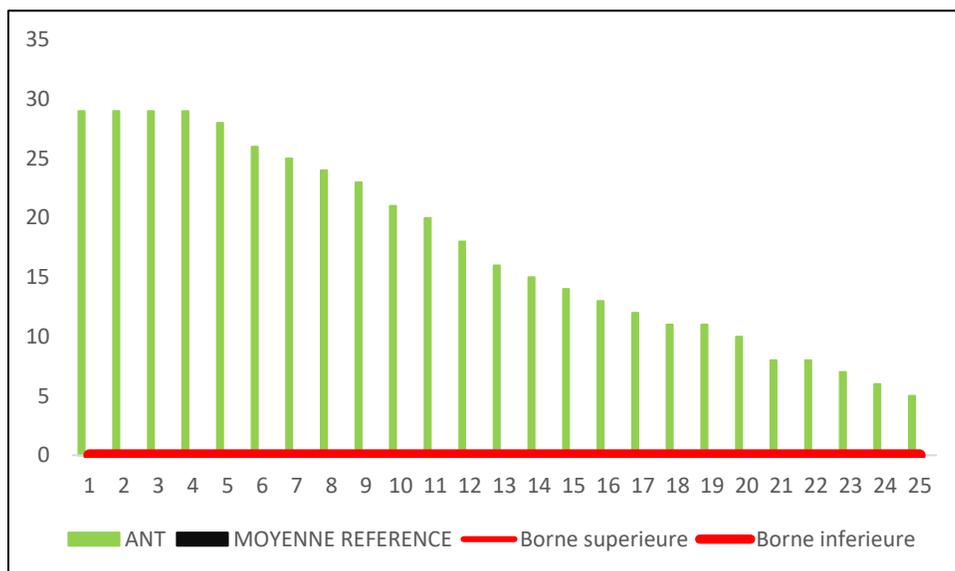


Figure D.23 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (anthropiques)

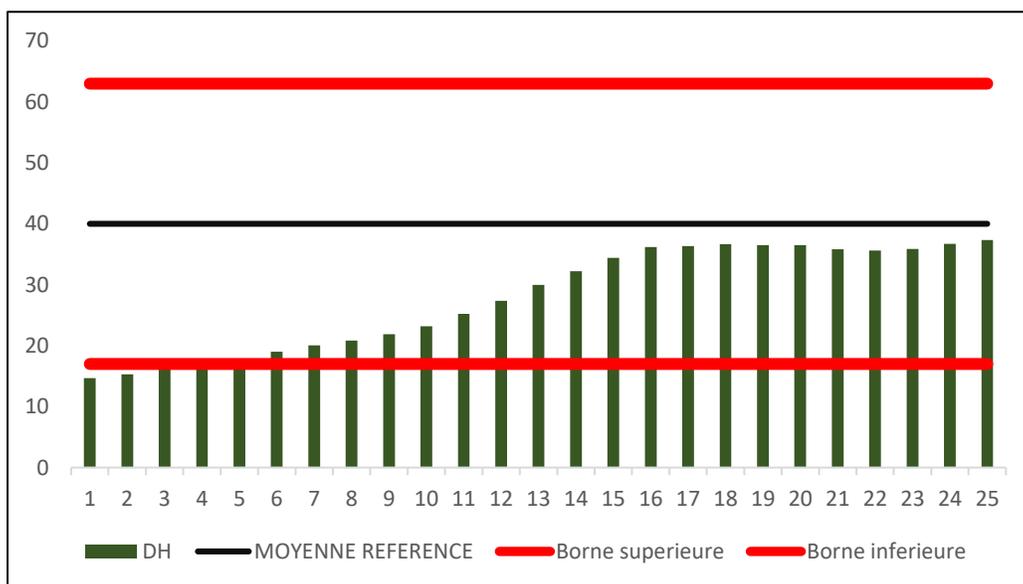


Figure D.24 : Comparaison entre le paysage à proximité de Casa Berardi et celui des sites de référence (dénudés humides)

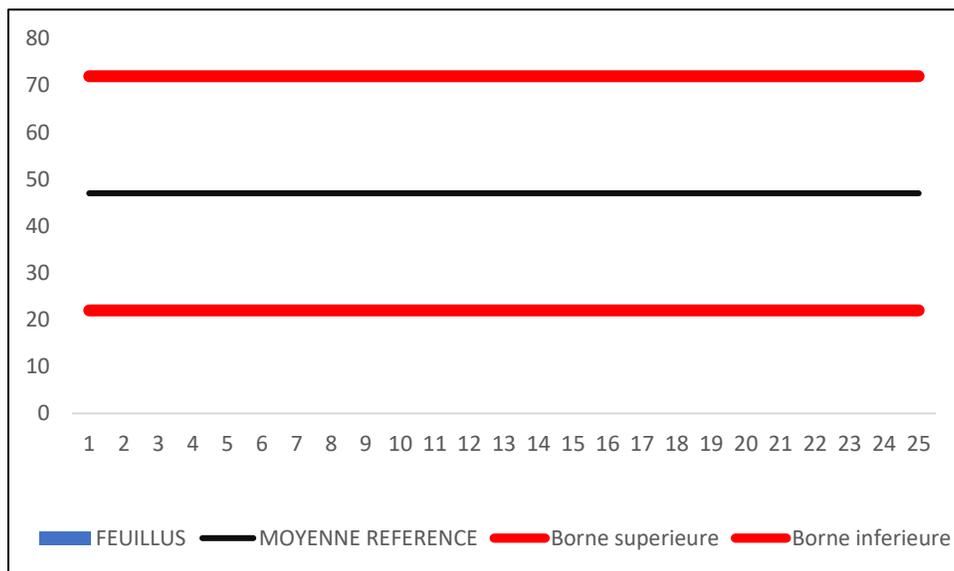


Figure D.25 : Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence (feuillus)

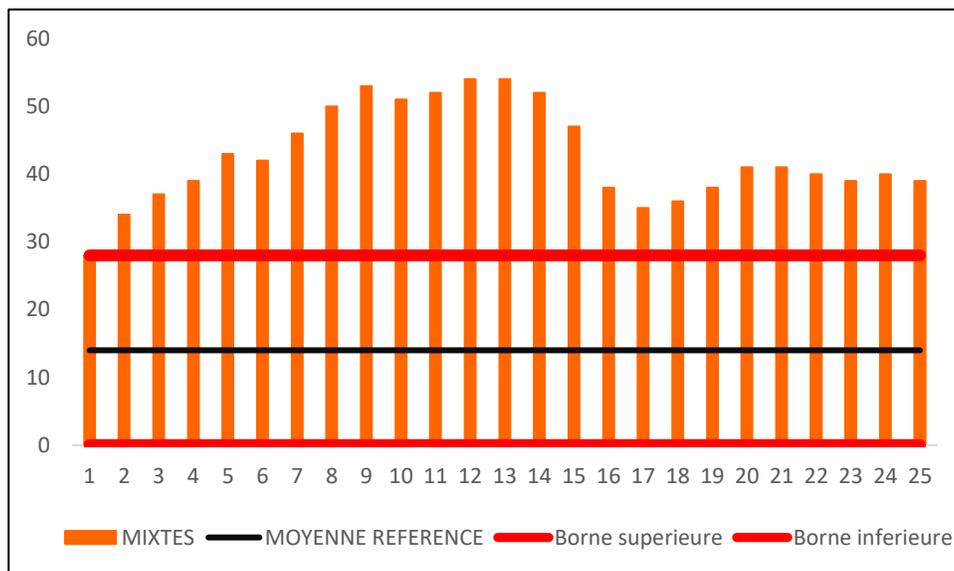


Figure D.26 : Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence (mixtes)

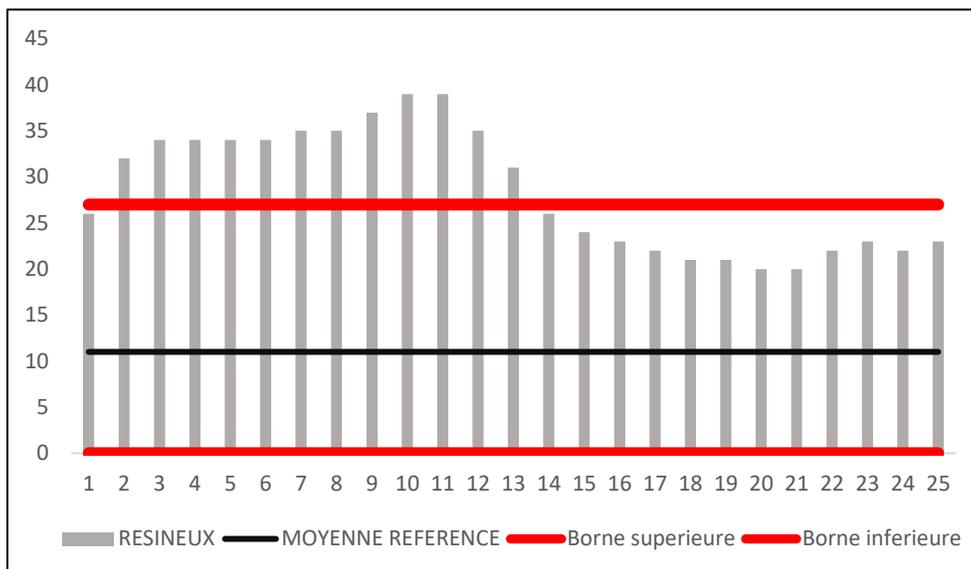


Figure D.27 : Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence (résineux)

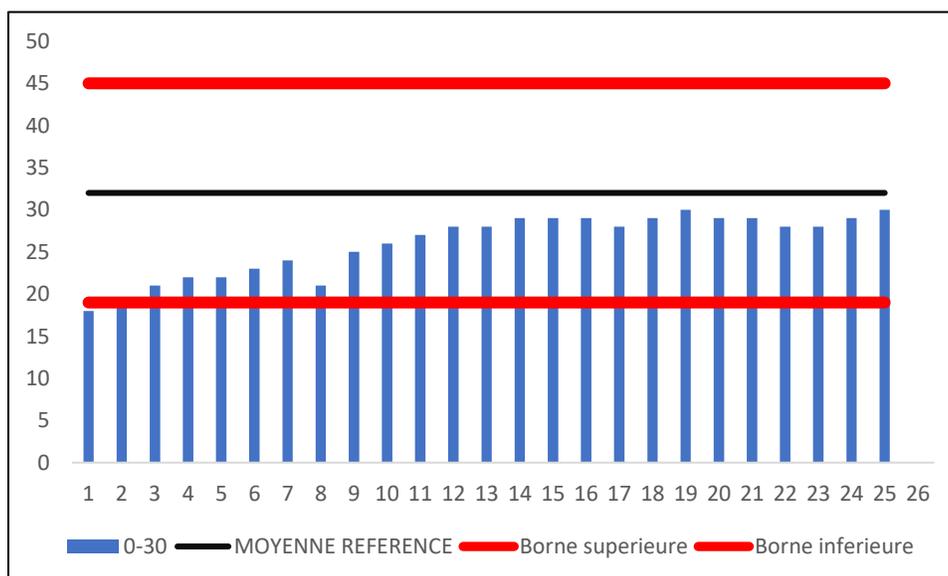


Figure D.28: Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence (0-30 ans)

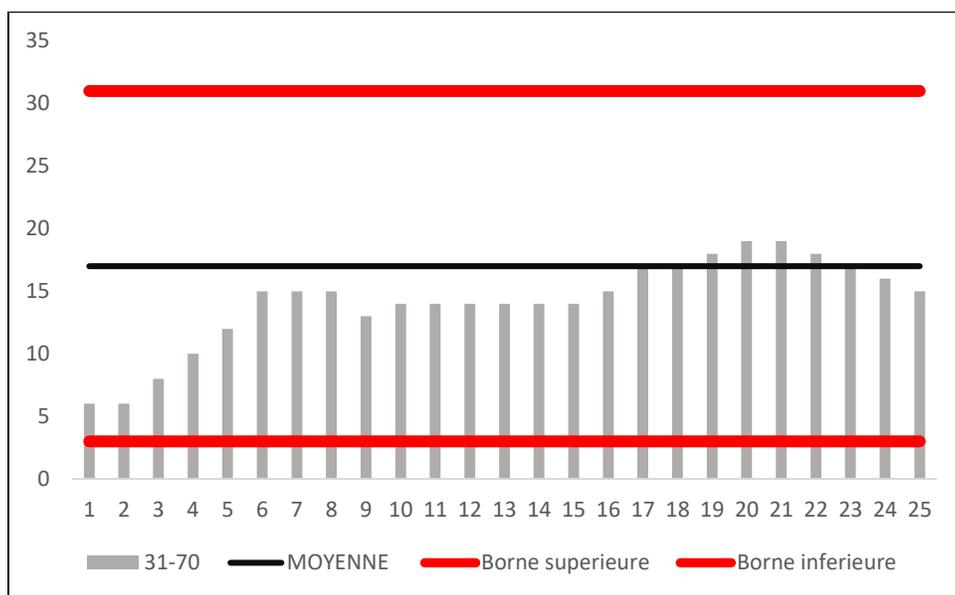


Figure D.29 : Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence
(31-70 ans)

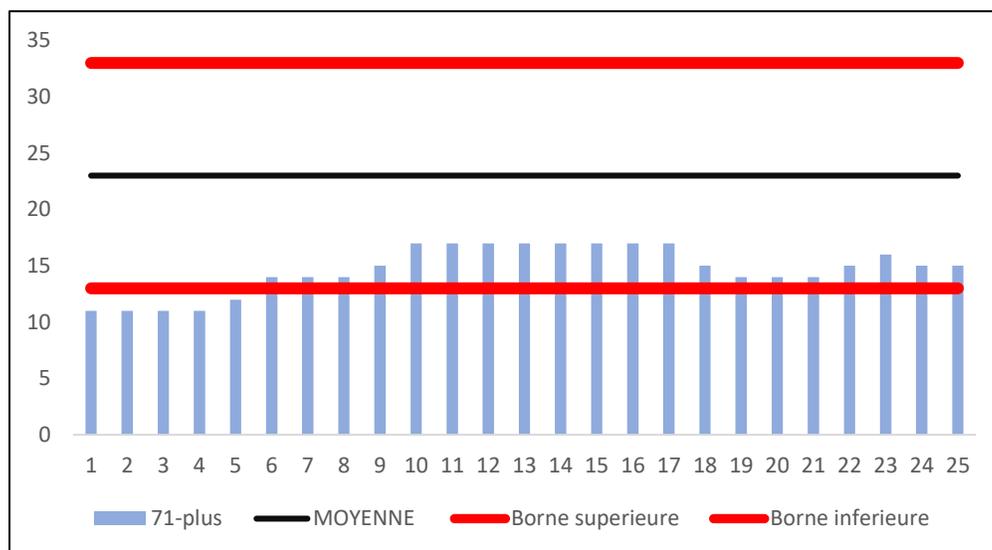


Figure D.30 : Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence
(71 ans et plus)

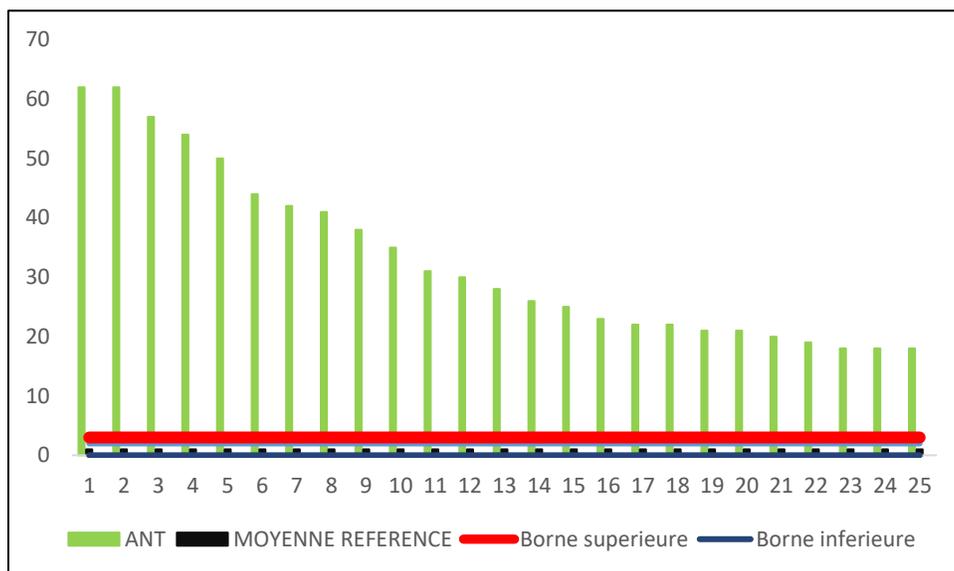


Figure D.31 : Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence (anthropiques)

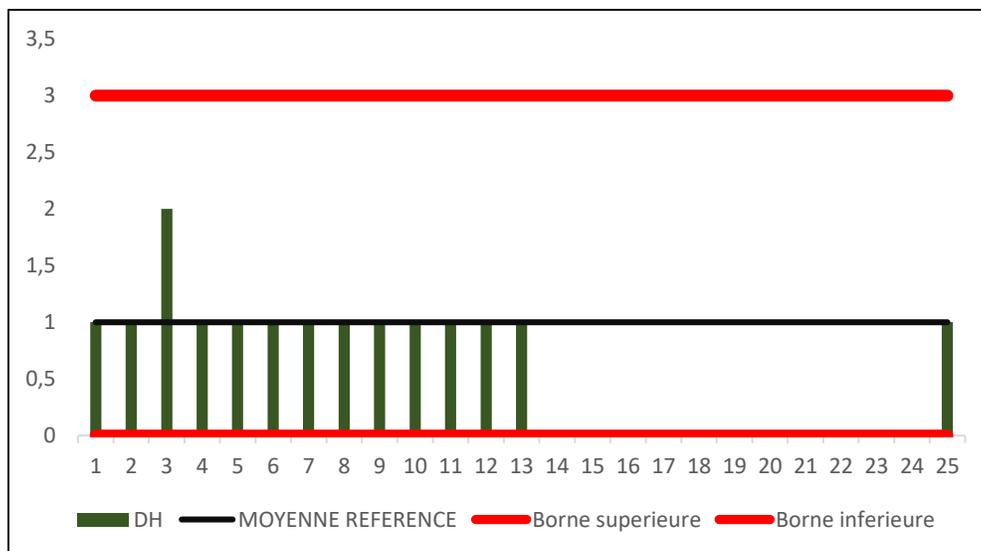


Figure D.32 : Comparaison entre le paysage à proximité de Lapa et celui des sites de référence (dénudés humides)

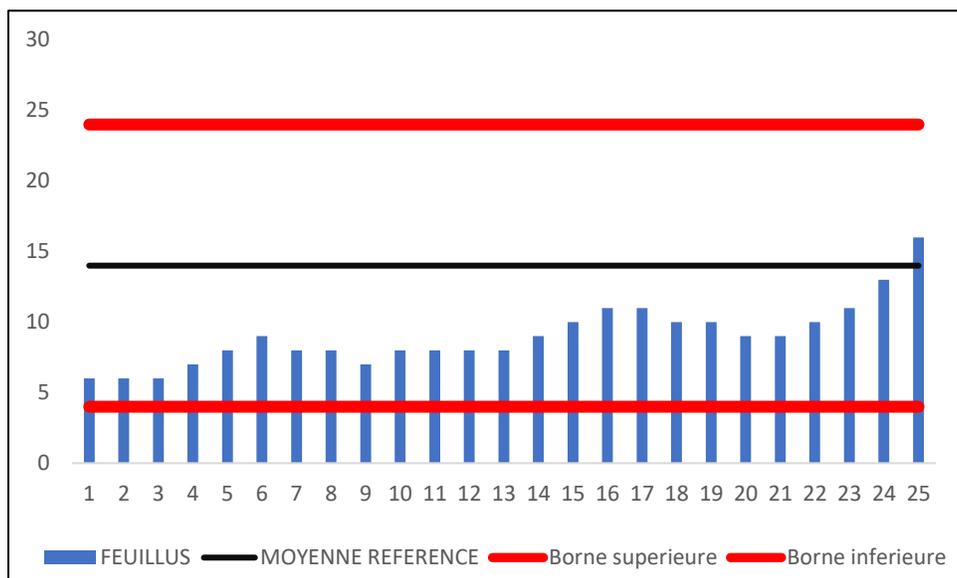


Figure D.33 : Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence
(feuillus)

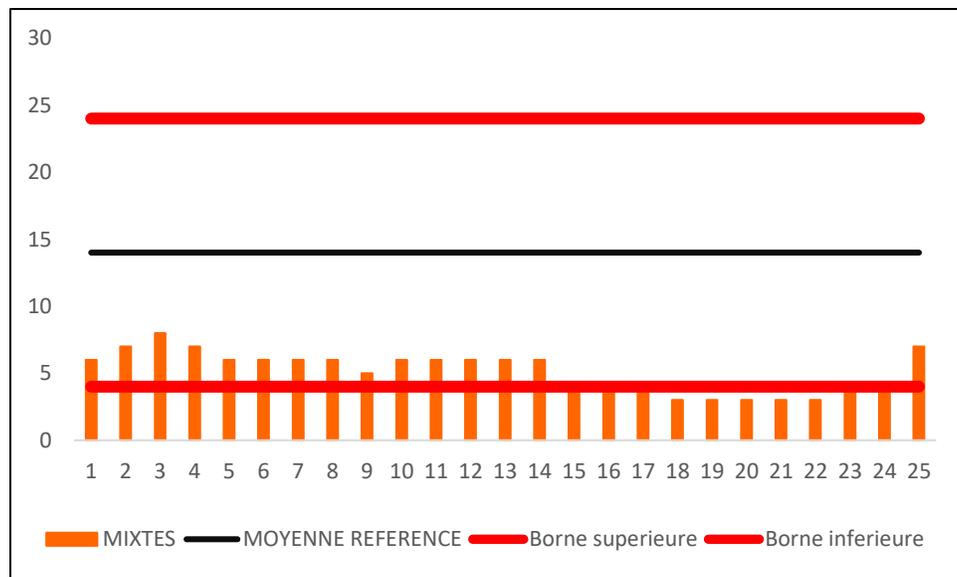


Figure D.34 : Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence
(mixtes)

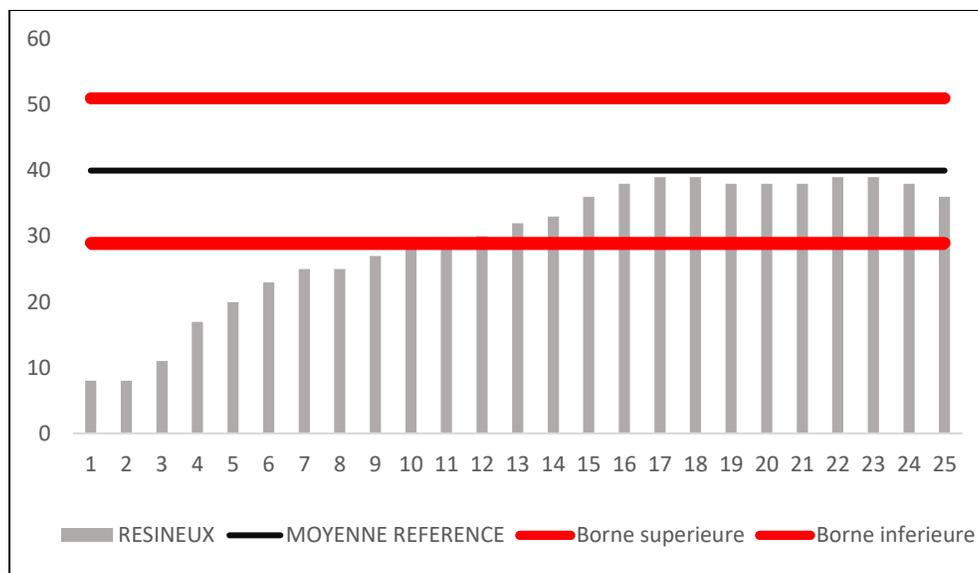


Figure D.35 : Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence
(résineux)

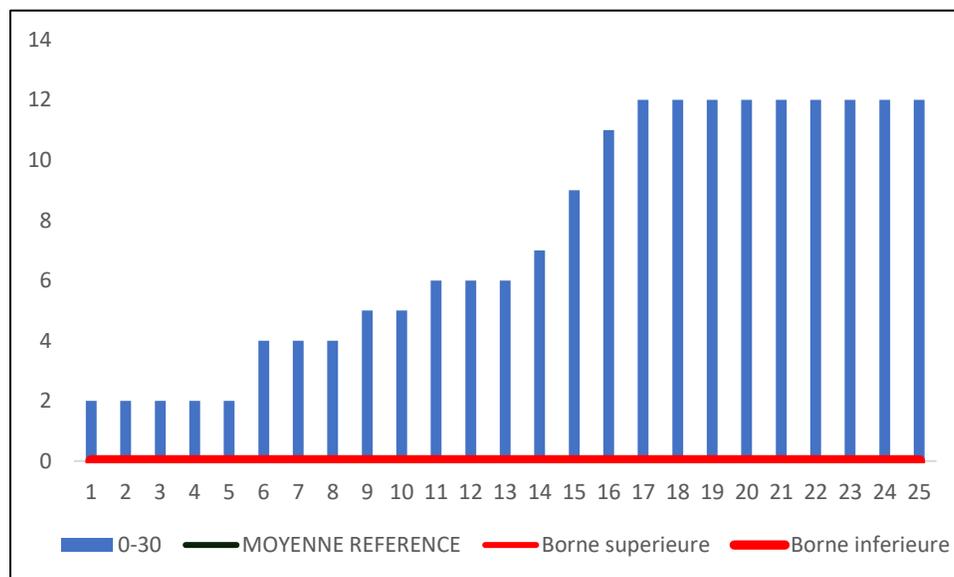


Figure D.36 : Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence
(0-30 ans)

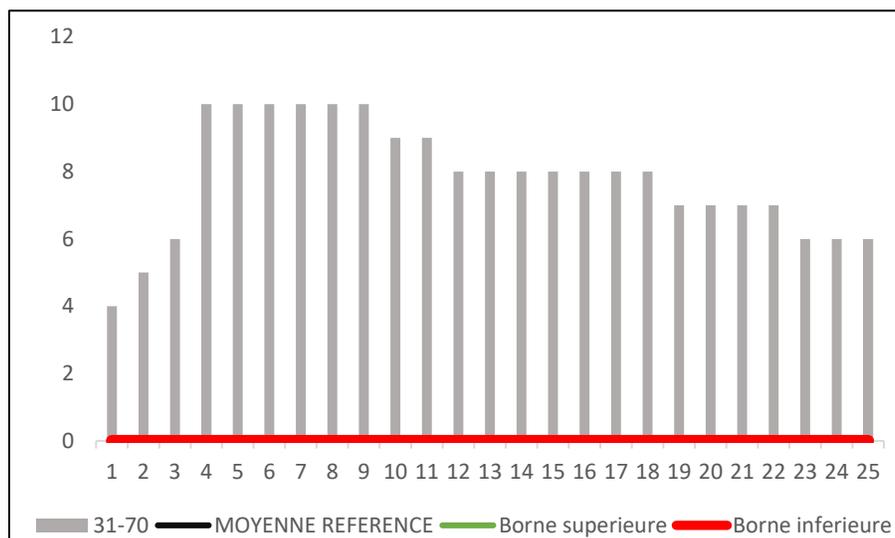


Figure D.37: Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence
(31-70 ans)

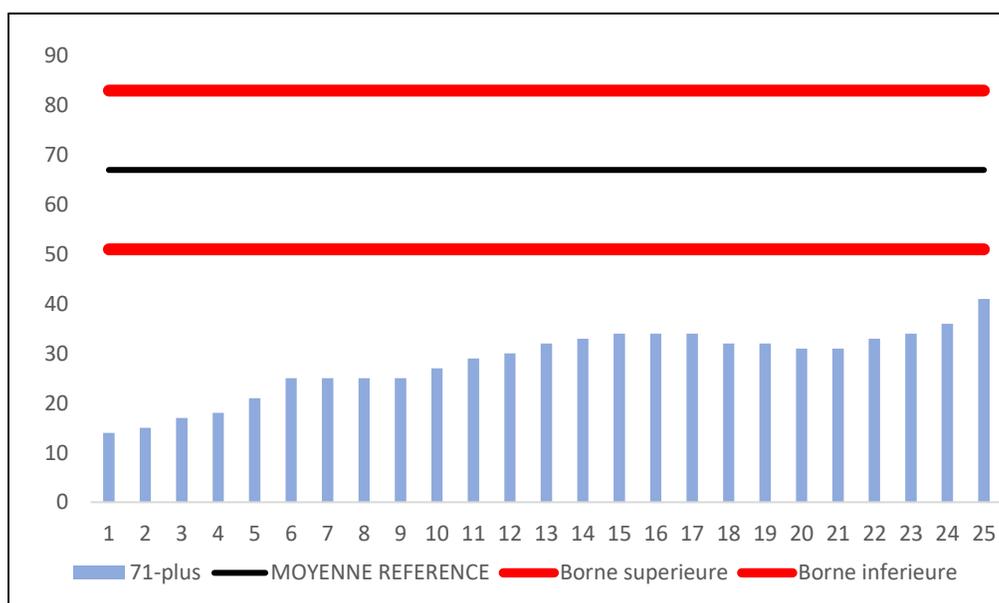


Figure D.38: Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence
(71 ans et plus)

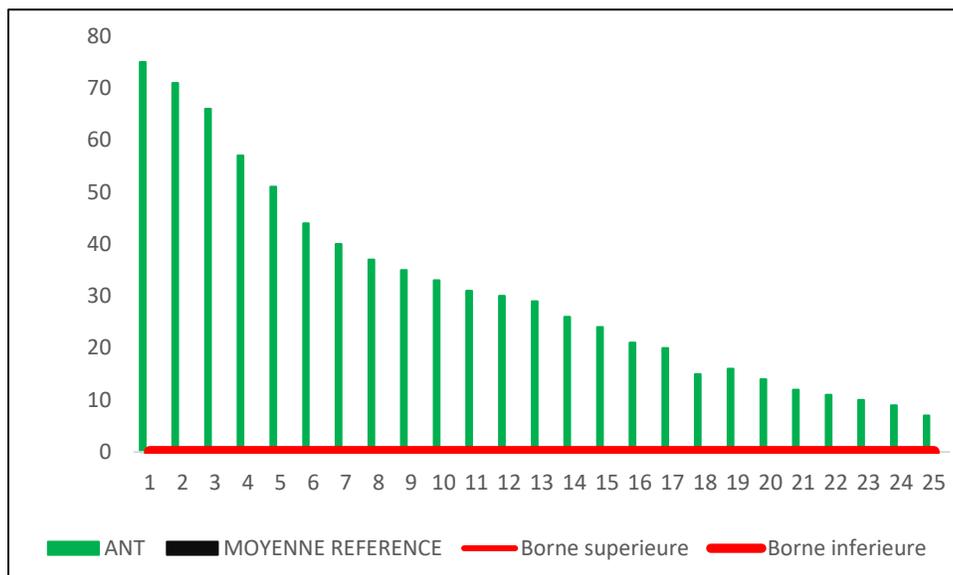


Figure D.39: Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence (anthropiques)

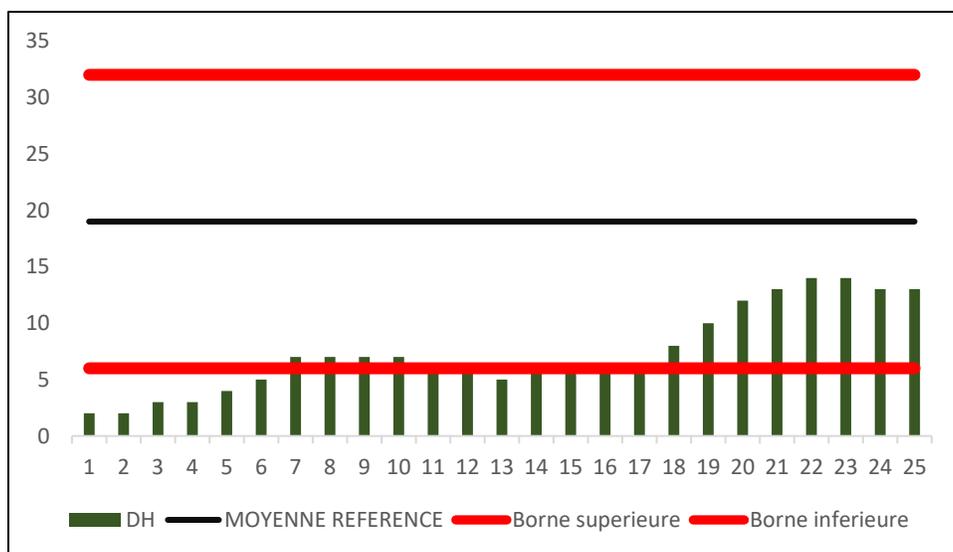


Figure D.40: Comparaison entre le paysage à proximité de Joutel et celui des sites de référence (dénudés humides)

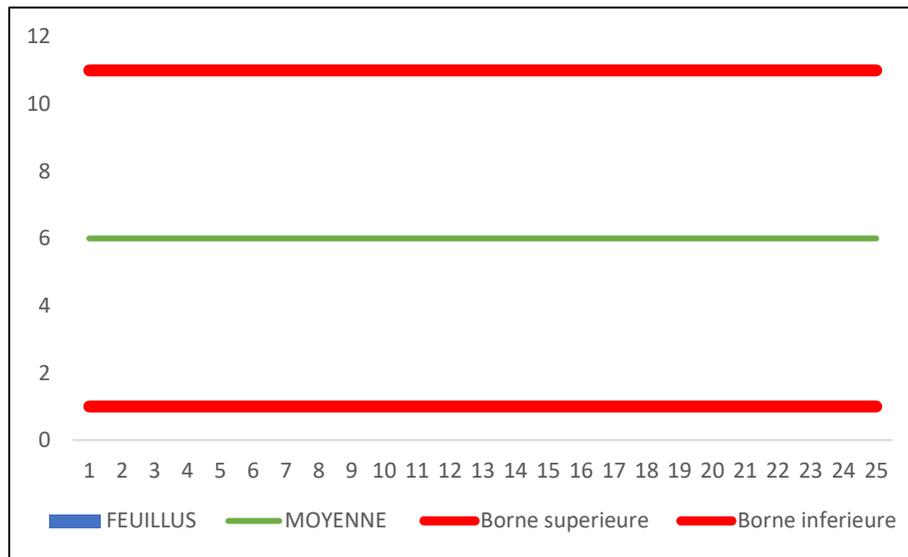


Figure D.41: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence (feuillus)

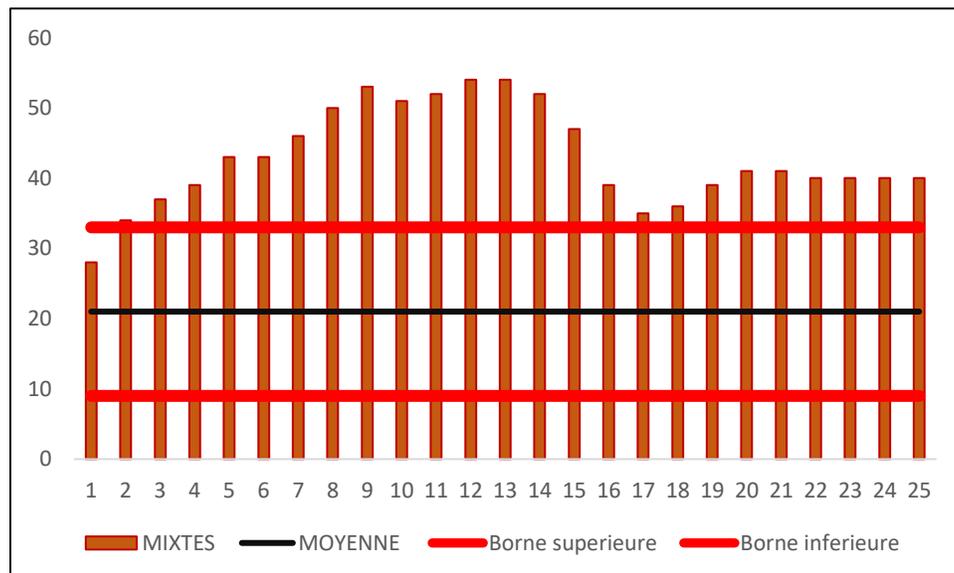


Figure D.42: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence (mixtes)

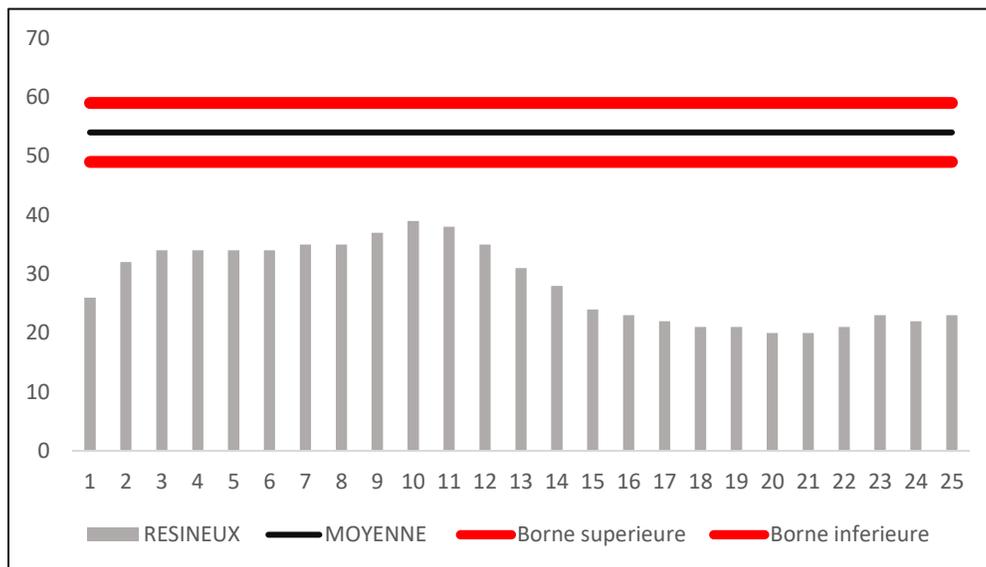


Figure D.43: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence (résineux)

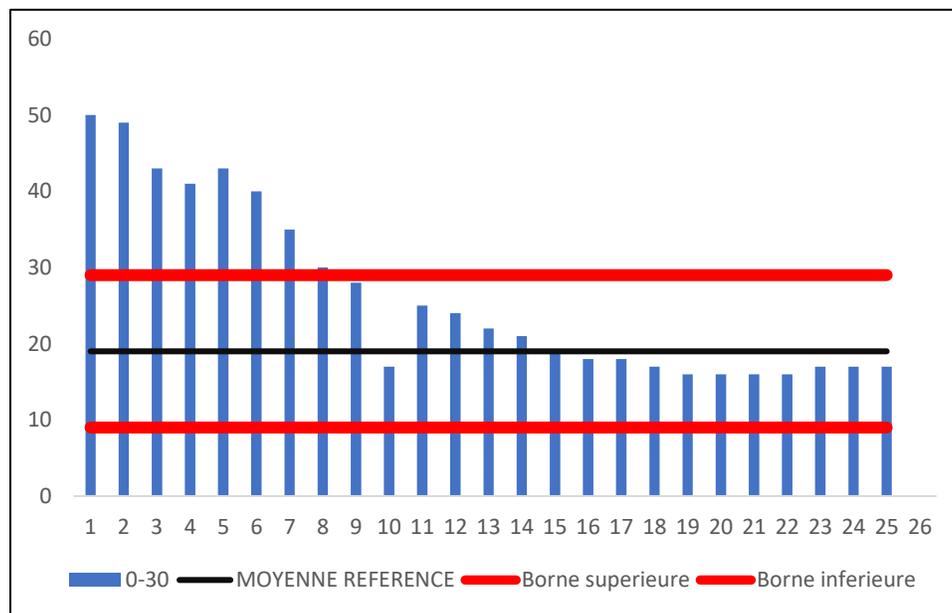


Figure D.44: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence (0-30 ans)

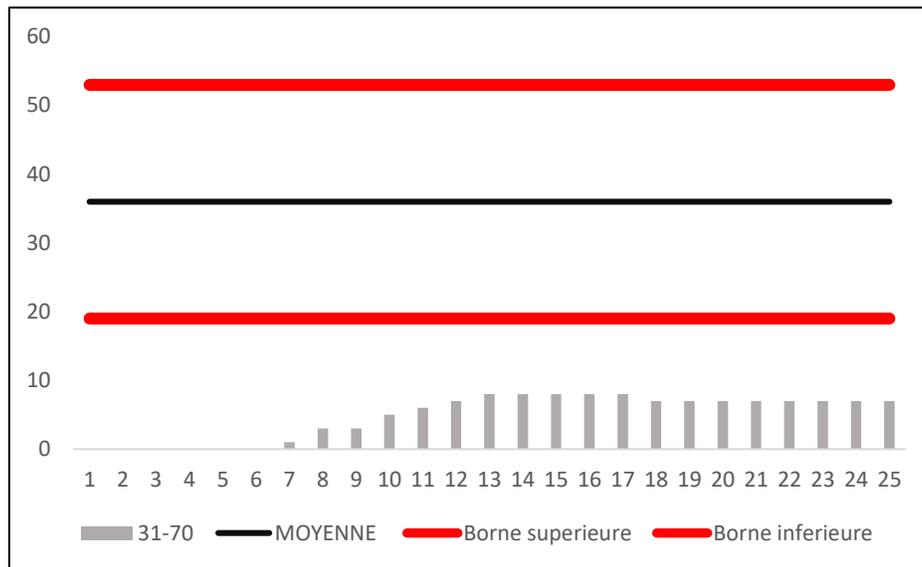


Figure D.45: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence
(31-70 ans)

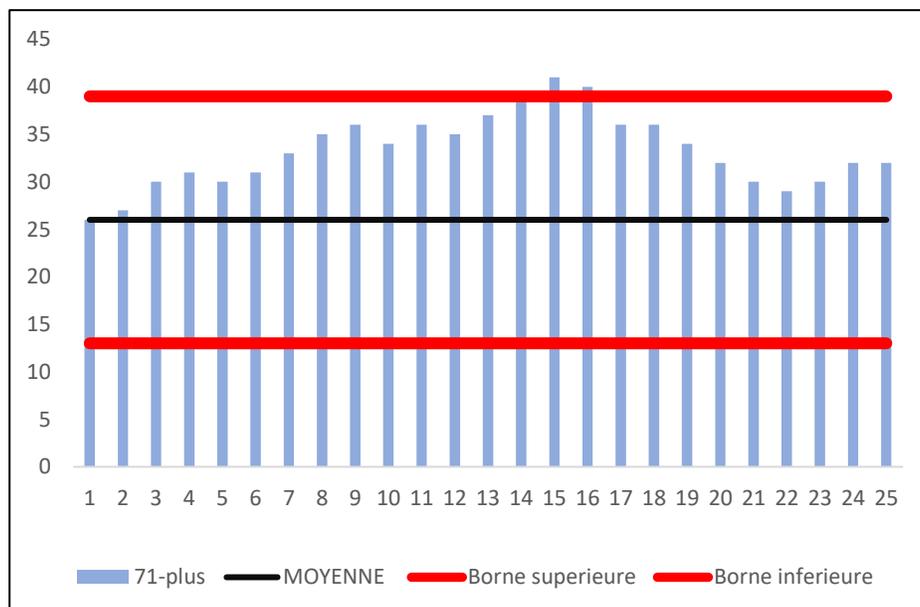


Figure D.46: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence
(71 ans et plus)

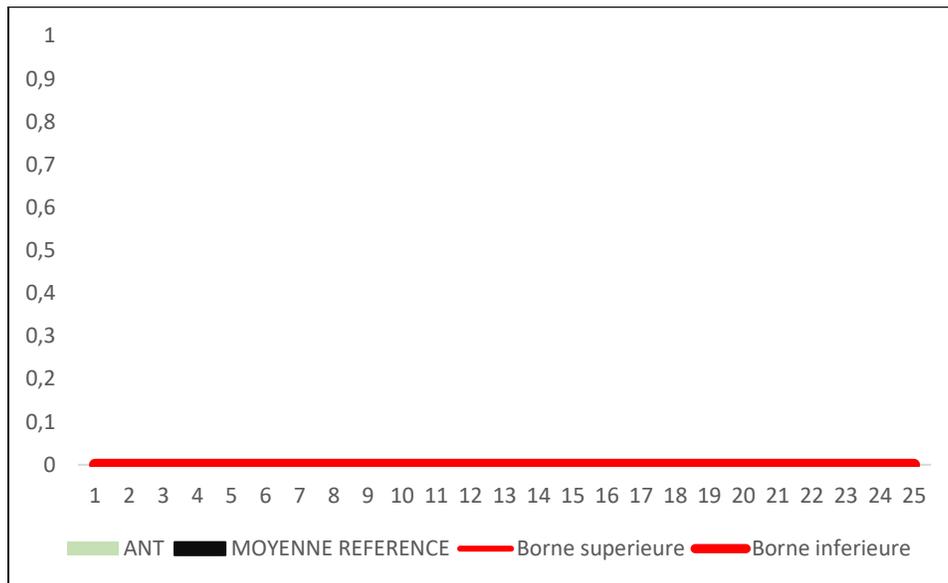


Figure D.47: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence (anthropiques)

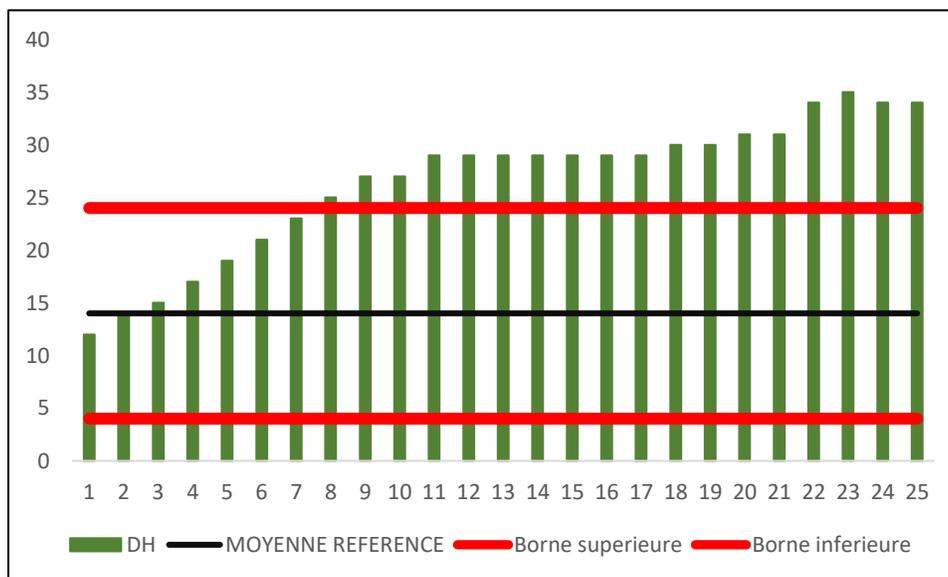


Figure D.48: Comparaison entre le paysage à proximité de Akasaba et celui des sites de référence (dénudés humides).

Annexe E : La liste complète de la classe de types de terrains du Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs (2015)

Tableau E : Liste de la classe des types de terrains

CODES	DESCRIPTION
A	Terrain Agricole
AEP	Aire d'empilement et d'ébranchage (de plus d'un an)
AER	Aéroport
AL	Aulnaie
AUT	Autres terrains
AF	Terrain agricole localisé dans les secteurs à vocation forestière
ANT	Milieu fortement perturbé par l'activité humaine (non-boisé)
BAS	Bassin de filtration, de décontamination, pisciculture
BAT	Batture
BHE	Barrage hydroélectrique
BLE	Bleuetière
CAM	Camping
CAR	Carrière
CEX	Centre expérimental
CF	Coupe-feu
CFO	Camp forestier
CHE	Centrale hydroélectrique
CIM	Cimetière d'automobiles
CNE	Jardin botanique
CS	Pistes de ski
CU	Centre urbain
CV	Colonie de vacances
DEF	Défriché

DEM	Déchets de mine
DEP	Dépotoir
DH	Dénudé humide
DS	Dénudé sec
DSC	Dénudé et semi-dénudé sec couvert à plus de 40% de cladonies
EAU	Étendue d'eau
GOL	Golf (partie déboisée)
GR	Gravière
HAB	Habitations
IL	Île boisée de 2 ha et moins
ILE	Île superficie < 1 ha
INC	Nature inconnue
INO	Site inondé, site exondé non régénéré
LTE	Ligne de transport d'énergie
MI	Mine
NX	Inclusion non exploitable à l'intérieur d'un traitement sylvicole
OBS	Centre d'observation radar
PAI	Parc industriel
PIC	Piste de course
PIN	Plaine inondée
PPN	Pépinière
QUA	Quai
RO	Route et autoroute (emprise)
SC	Sciérie
TNP	Territoire non photo-interprété lors du troisième inventaire
TOE	Tourbière exploitée
US	Usine

VIL	Villégiature (partie déboisée)
VRG	Verger fruitier
NF	Milieu faiblement perturbé par l'activité humaine (boisé)
RO	Route et autoroute (emprise)