

Analyse systémique d'un ouvrage de confinement de résidus miniers

Boaz Jean-Michel REMY^{1,2}, Gisèle BAMBARA¹, Marie GUITTONNY², Corinne CURT¹

¹INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France

²Institut de recherche en mines et environnement (IRME), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Rouyn-Noranda, QC, Canada

RESUME Cette étude a pour objectif de réaliser une analyse systémique sur un type d'ouvrage de restauration des sites miniers, la Couverture à Effets de Barrière Capillaire (CEBC). Elle est mise en œuvre pour confiner les rejets miniers réactifs en limitant les flux d'oxygène, permettant ainsi d'assurer leur stabilité chimique et de réduire le drainage minier acide en conditions non-saturées. Deux méthodes de sureté de fonctionnement, l'analyse fonctionnelle et l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Causes et de leurs Effets (AMDE) ont été utilisées. L'étape d'analyse fonctionnelle a permis d'identifier et de formaliser la fonction principale et 16 fonctions de contrainte de l'ouvrage ainsi que 3 fonctions techniques et 10 fonctions de contrainte pour les 5 composants de la CEBC. L'étape d'analyse dysfonctionnelle (AMDE) a conduit à identifier les modes de dysfonctionnement potentiels, leurs causes sous-jacentes et leurs impacts. Cette analyse est une première étape essentielle pour la construction future d'un outil d'évaluation de la performance, afin d'assurer l'efficacité de la CEBC. Cette démarche permettra de renforcer la gestion et la surveillance des sites miniers restaurés, assurant ainsi sur le long terme une meilleure protection de l'environnement.

Mots-clefs Ouvrage de restauration minière, Couverture à Effets de Barrière Capillaire, Analyse fonctionnelle, Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

I. INTRODUCTION

L'exploitation minière est une ancienne activité qui fournit une large gamme de matières premières essentielles à la fabrication de nombreux produits. Cette activité n'est cependant pas sans impact sur l'environnement. En effet, les rejets miniers peuvent affecter l'eau, l'air, le sol et la biodiversité de manière générale (Laroche, 2011). Parmi ces rejets miniers, nous retrouvons les stériles miniers, les boues de traitement des eaux minières, et les résidus miniers issus du traitement du minerai (Aubertin et al., 2002). L'une des principales problématiques associées aux résidus miniers est la formation du drainage minier acide (DMA). Ce phénomène peut se produire quand les minéraux sulfureux (pyrite, chalcopirite etc.) contenus dans les résidus miniers entrent en contact avec l'oxygène de l'air et l'eau (Blowes et al., 2014). Le DMA peut contaminer les eaux souterraines et de surface, entraînant la destruction de la faune et de la flore. Cette acidification du milieu peut se poursuivre durant des centaines d'années (Bussière and Guittonny, 2020). Pour pallier ces effets négatifs, la législation minière dans de nombreux pays, comme le Canada, notamment au Québec, exige qu'un plan de restauration minière soit établi par les titulaires de permis d'exploitation (Gouvernement du Québec, 2024). Ce plan définit les techniques de restauration à appliquer sur les parcs à résidus miniers afin de minimiser les impacts environnementaux associés à la

génération du DMA. Au Québec, 19 mines sont actuellement en opération et leurs parcs à résidus devront être restaurés. De plus, le ministère des ressources naturelles et des forêts est responsable de la restauration de 346 sites miniers abandonnés (sans propriétaire). Selon les sites, les parcs à résidus couvrent de quelques hectares à plusieurs centaines d'hectares pour des épaisseurs de l'ordre du mètre à plusieurs dizaines de mètres. Toutefois, tous les résidus miniers n'engendrent pas du DMA. Parmi les différentes techniques proposées pour contrôler le DMA, l'une d'entre elles consiste à limiter l'interaction des résidus miniers avec l'oxygène par l'utilisation d'un système de recouvrement de type barrière à l'oxygène, comme par exemple une Couverture à Effets de Barrière Capillaire (CEBC) (Aubertin et al., 1995; Bussière et al., 2003; Bussière and Guittonny, 2020; Dagenais et al., 2005; Lundgren, 2001; MEND, 2004; Nicholson et al., 1989; Yanful et al., 1993).

La CEBC est un ouvrage multicouche conçu pour limiter la diffusion de l'oxygène dans les résidus miniers sulfureux. Elle est constituée au minimum de trois couches, soit une couche de granulométrie fine (argile ou silt) intercalée entre deux couches de granulométrie grossière (sable ou gravier). Le principe de fonctionnement d'une CEBC est d'assurer une humidité importante dans la couche de granulométrie fine (couche de rétention d'humidité). Cette humidité élevée réduit considérablement le flux de l'oxygène puisqu'il se déplace par diffusion 10 000 fois plus lentement dans l'eau que dans l'air (Aachib et al., 2004). En raison des contrastes de granulométrie des matériaux utilisés dans les différentes couches et des écarts de propriétés hydrogéologiques qui en découlent, un phénomène connu sous le nom d'effet de barrière capillaire se produit (Morel-Seytoux, 1993). Cet effet agit en empêchant l'ascension de l'eau dans la couche située juste au-dessus des matériaux fins, tout en limitant le drainage dans la couche située juste en-dessous. Ainsi, l'eau s'accumule dans la couche centrale de granulométrie fine (Bussière and Guittonny, 2020). Cependant, il est essentiel que l'intégrité physique des matériaux soit préservée au fil du temps pour garantir la chaîne fonctionnelle de l'effet de barrière capillaire à long terme, en dépit de toutes les variations des conditions du milieu extérieur. Les CEBC sont en effet des ouvrages dont la performance doit être maintenue sur plusieurs centaines d'années, voire à perpétuité.

D'autre part, le développement d'un peuplement végétal, qu'il soit spontané ou planté, est souhaité sur les sites miniers restaurés afin de favoriser une réhabilitation écologique à long terme. Comme les CEBC construites sur des parcs à résidus miniers pour limiter le DMA sont des ouvrages relativement jeunes (datant de 30 ans et moins), l'impact de l'évolution d'un peuplement végétal sur une CEBC reste à ce jour peu documenté. Les cas d'étude existants sont localisés en région de forêt tempérée nordique ou boréale où la recolonisation progressive d'une végétation arborée est observée avec le temps (Proteau et al., 2020a; Smirnova et al., 2011). Étant donné que les systèmes racinaires consomment de l'eau et de l'oxygène, il est possible que la végétation ait un impact à long terme sur la structure et le fonctionnement de la CEBC (Guittonny et al., 2022). Dans ce contexte, une étude sur l'influence de la végétation et de ses racines sur la performance d'une CEBC sur un site minier, dix-sept ans après sa restauration, a été menée. Cette étude a fourni des résultats significatifs sur l'impact des racines sur les propriétés hydrogéotechniques des matériaux constituant la CEBC (Proteau et al., 2020b, 2021). La présence de racines entraîne d'un côté une diminution de la conductivité hydraulique saturée de la couche de rétention d'humidité, et d'un autre côté une consommation d'oxygène, et la CEBC reste performante. La performance devrait être maintenue à long terme si la colonisation racinaire reste principalement à la surface de la couche de rétention d'humidité. Cependant, il est recommandé de surveiller attentivement l'évolution de la végétation pour évaluer la progression de la colonisation racinaire dans le profil de la CEBC.

Dans l'optique de disposer d'une méthode d'évaluation et de suivi de la performance d'une CEBC exposée aux milieux extérieurs, incluant la végétation, cette étude constitue une première étape essentielle qui vise à réaliser une analyse systémique de ce type d'ouvrage en utilisant des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement. Nous présentons dans un premier temps les méthodes de ce type utilisées puis leurs applications pour le cas particulier d'une CEBC. Les résultats obtenus ont fait l'objet au cours des différentes étapes de l'analyse, de phases de validation avec un expert en ingénierie de la restauration minière extérieur à l'équipe projet.

II. MATERIEL ET METHODES

Deux méthodes, issues de la sûreté de fonctionnement ont été utilisées pour examiner le fonctionnement et les dysfonctionnements éventuels d'une CEBC « générique ». Ce type de méthode se révèle être adapté à la modélisation systémique des ouvrages d'ingénierie, offrant des approches à la fois qualitatives et quantitatives. Dans le cadre de cette étude, nous privilégions une approche qualitative. Notre étude s'est appuyée sur les travaux menés par (Bambara, 2016; Peyras, 2003; Serre, 2005; Vuillet, 2012) qui ont appliqué les méthodes de sûreté de fonctionnement à des ouvrages hydrauliques tels que les barrages poids et les digues en remblai. Ainsi par analogie, nous avons mis en œuvre les méthodes suivantes pour l'analyse systémique d'une CEBC :

- L'analyse fonctionnelle (AF) du système, qui consiste à identifier, formaliser et étudier les fonctions du système et de ses composants ;
- L'analyse des modes de défaillance, de leurs causes et de leurs effets (AMDE), qui permet de répertorier les défaillances potentielles susceptibles d'entraver ou d'altérer les fonctions du système, ainsi que leurs causes, leurs effets et les indicateurs associés.

A. Analyse fonctionnelle d'un système

L'analyse fonctionnelle d'un système se déroule en deux étapes principales en suivant la méthode APTE : l'analyse fonctionnelle externe et l'analyse fonctionnelle interne (FIGURE 1).

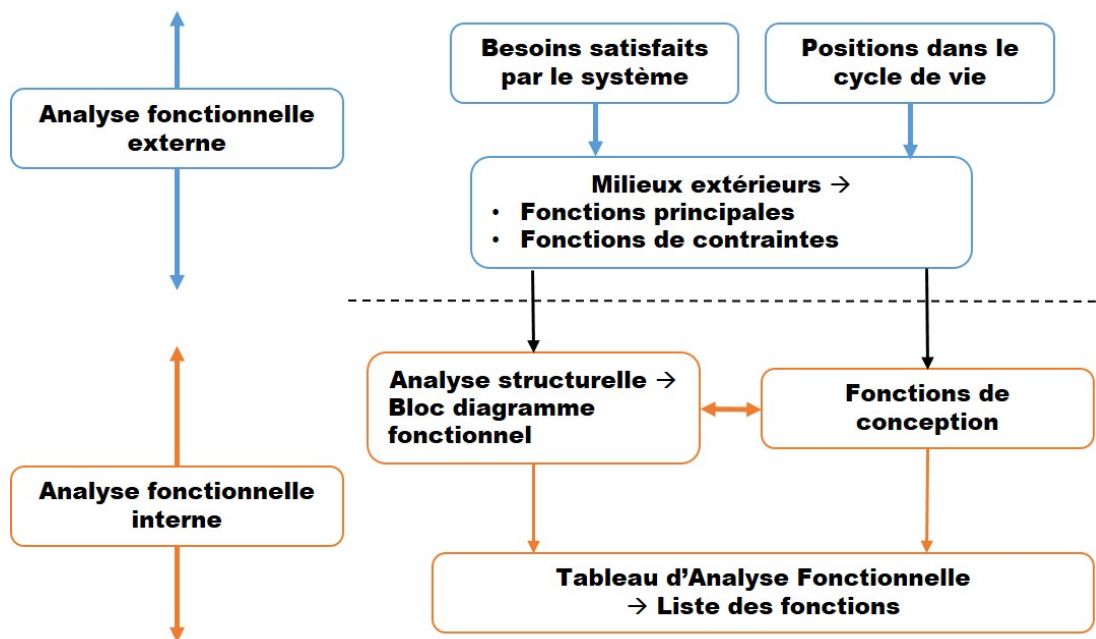


FIGURE 1. Processus d'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)

L'analyse fonctionnelle externe comprend :

- La définition du système afin d'étudier les interactions qu'il peut avoir avec le milieu extérieur ;

- Le besoin satisfait par le système ;
- Les positions du cycle de vie du système qui font référence aux étapes par lesquelles un système passe depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie ;
- La recherche des milieux extérieurs (ME) au système afin de comprendre les influences et interactions qu'ils peuvent avoir avec le système ;
- La recherche des fonctions principales et des fonctions de contraintes. L'établissement d'un diagramme appelé « pieuvre » (FIGURE 2) permet de représenter les relations établies entre le système et les milieux extérieurs et ainsi définir les deux types de fonctions : principales et de contraintes. Les fonctions principales représentent le but de l'action du système, elles sont l'expression du besoin. Elles identifient les relations créées par le système entre deux ou plusieurs éléments de son milieu extérieur. Les fonctions de contraintes correspondent aux réponses que doit apporter le système pour faire face aux contraintes qui lui sont imposées par son environnement, et ainsi permettre la réalisation de ses fonctions principales et garantir sa pérennité. Elles définissent les contraintes imposées au système par son milieu extérieur (Zwingelstein, 1995).

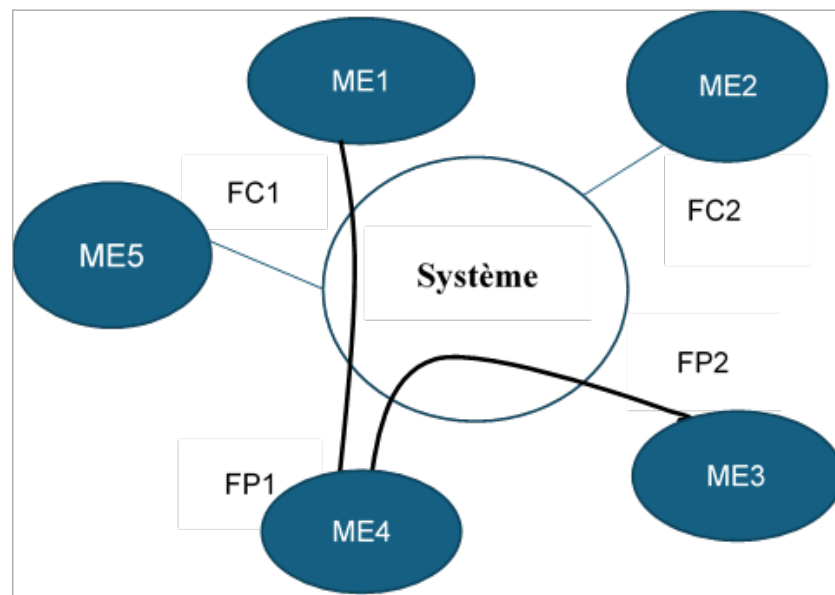


FIGURE 2. Diagramme « pieuvre » (Zwingelstein, 1995)

L'analyse fonctionnelle interne comprend :

- Le choix de la granularité de travail (granularité supérieure à l'échelle de la structure ; granularité intermédiaire à l'échelle de chaque composant ; granularité inférieure à l'échelle des sous composants) ;
- L'analyse structurelle qui permet de répertorier l'ensemble des composants du système ;
- La réalisation de blocs diagrammes fonctionnels (BdF) qui permettent de mettre en évidence les interactions entre les composants et les milieux extérieurs, entre les composants eux-mêmes et les circulations de flux à travers ou à l'intérieur du système et de ses composants. Cette étape permet d'identifier les fonctions techniques (ou fonction de conception) qui

traduisent les objectifs techniques auxquels doivent répondre les composants du système pour réaliser les fonctions principales tout en prenant en compte les fonctions de contraintes ;

- Le tableau d'analyse fonctionnelle qui résume les résultats de l'analyse fonctionnelle (TABLEAU 1).

TABLEAU 1. Structure d'un tableau d'analyse fonctionnelle (Zwingelstein, 1995)

N°	Composant	Fonction de contrainte	Fonction technique
1			
2			
3			

B. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Cette approche examine chaque composant du système l'un après l'autre. Un mode de défaillance se caractérise par la non-réalisation d'une fonction quelconque. Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux (TABLEAU 2), spécialement conçus pour le type de système étudié. Ce tableau permettra de lister les composants susceptibles de rencontrer une défaillance de leurs fonctions, leurs causes, leurs effets attendus, ainsi que les moyens de les détecter.

TABLEAU 2. Structure d'un tableau AMDE (Serre, 2005)

N°	Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Symptôme	Moyen de détection
1							
2							
3							

III. ANALYSE FONCTIONNELLE D'UNE CEBC

A. Analyse fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle externe d'une CEBC porte sur le système dans son ensemble et sur ses milieux extérieurs. Le besoin satisfait par le système CEBC rend service à la biodiversité et à l'homme, il agit sur les résidus miniers et leur environnement local et il permet de limiter la génération du DMA à partir des résidus.

Dans notre approche d'analyse systémique, nous nous concentrons sur les années de service d'une CEBC qui sont influencées par le processus de conception et de réalisation.

Les milieux extérieurs en interaction avec le système sont déterminés en identifiant les éléments qui interagissent avec la CEBC ou subissent sa présence. Les interactions entre milieux extérieurs sont également identifiées. Ainsi, une représentation large des interactions est en premier lieu examinée. La FIGURE 3 illustre les différents milieux extérieurs en interaction avec une CEBC ainsi que les milieux extérieurs interagissant entre eux.

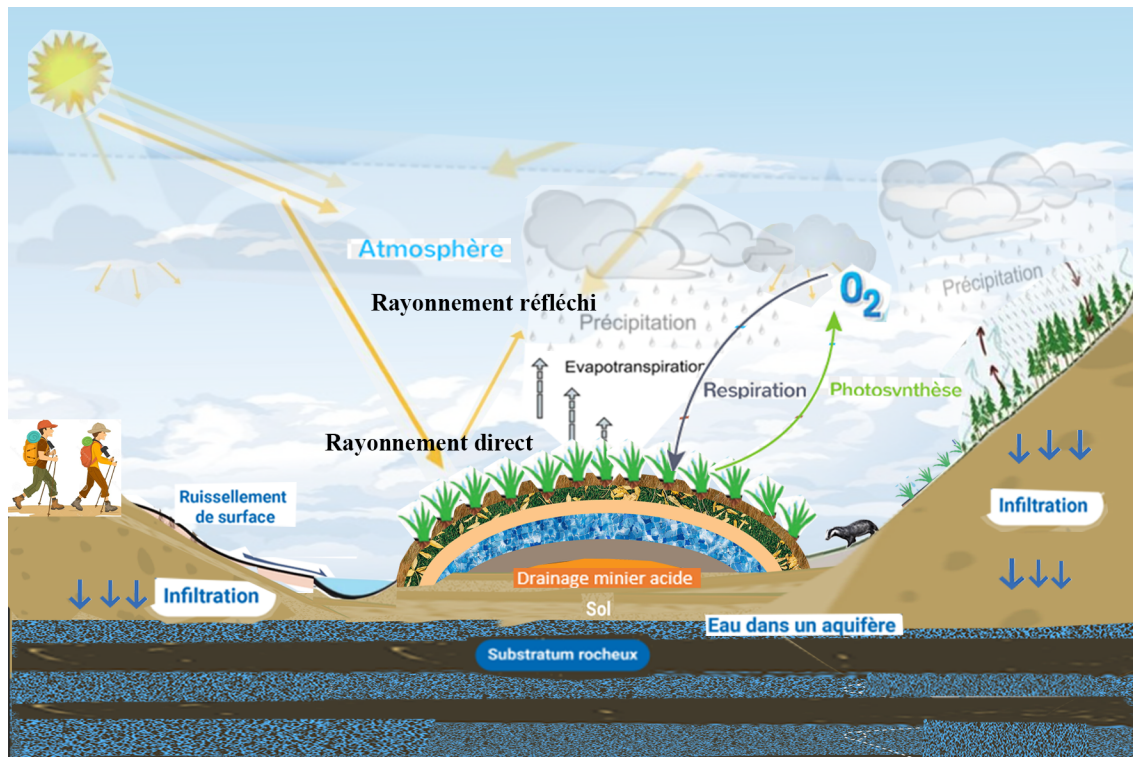


FIGURE 3. Représentation des milieux extérieurs d'une CEBC composée de ses différentes couches : couche de surface et de protection (environ 1 m) ; couche de bris capillaire supérieur (entre 30 et 50 cm) ; couche de rétention d'humidité (entre 50 et 100 cm) ; couche de bris capillaire inférieure (entre 30 et 50 cm)

Dans la suite de nos travaux, nous ne considérons que les milieux extérieurs immédiats à la CEBC c'est-à-dire, ceux qui sont en interaction directe avec celle-ci. Le TABLEAU 3 énumère les milieux extérieurs pris en compte et leurs interactions possibles.

TABLEAU 3. Liste des milieux extérieurs identifiés

Milieux	Actions ou interactions avec la CEBC
Activités anthropiques	Incendie, sylviculture, randonnée, élevage, exploitation ultérieure
Géologie du site	Ondes sismiques, subsidence
Topographie	Effet de pente, érosion
Nappe phréatique	Remontée de la nappe
Eau de surface	Crue, érosion
Météorologie	Température, neige, gel, sécheresse, vent, humidité de l'air, rayonnement, phénomène météorologique extrême, sécheresse
Appui (s) latéral	Infiltration de l'oxygène, point de support
Concentration O ₂	Diffusion de l'oxygène, Oxydation des résidus
Pluie	Précipitation, infiltration
Faune	Animaux fouisseurs, macrofaune, apport de matière organique
Microorganismes	Minéralisation, décomposition, humification, respiration cellulaire, apport de matière organique
Végétation	Racines des végétaux, respiration cellulaire, eau d'absorption, apport de matière organique, évapotranspiration
Résidus miniers	Remontée du DMA, oxydation, pollution

Après avoir identifié les milieux extérieurs au système, nous déterminons et représentons les fonctions principales et les fonctions de contraintes accomplies par le système dans son ensemble. Pour ce faire, nous utilisons un bloc diagramme fonctionnel (FIGURE 4), dans lequel nous distinguons deux types d'interactions : celles entre le système et les milieux extérieurs, que nous distinguons par les relations de contact représentées par des segments droits et celles créées par le système entre deux ou plusieurs milieux extérieurs, que nous distinguons par les relations de flux représentées par des arcs. Cette représentation permet de visualiser clairement les relations entre la CEBC et ses milieux extérieurs.

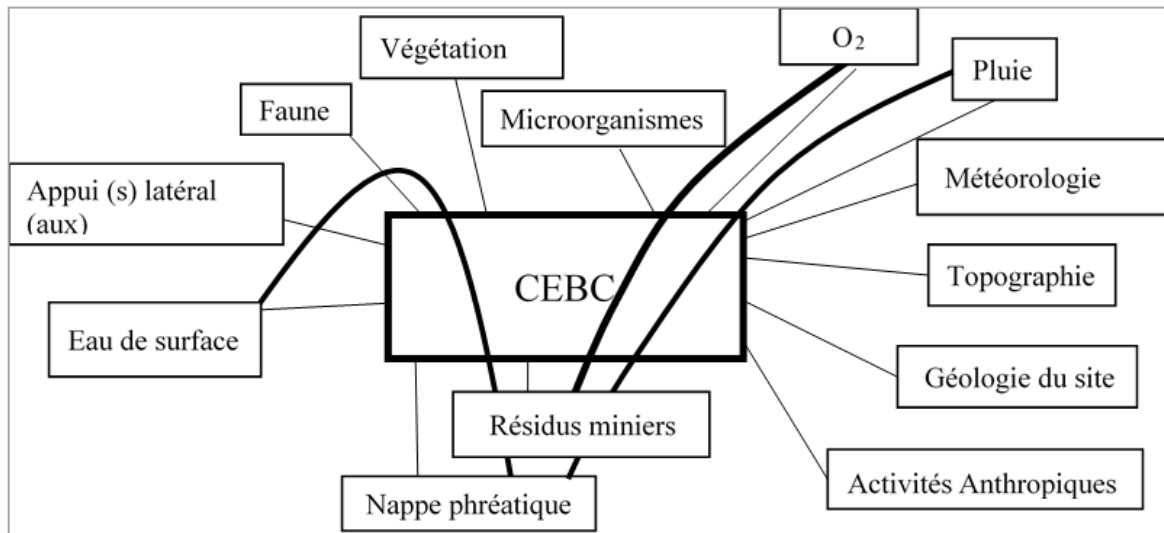


FIGURE 4. Bloc diagramme fonctionnel du système global (CEBC)

Les fonctions principales liées à la CEBC garantissent que cette dernière atteint ses objectifs principaux et répond aux besoins spécifiques pour lesquels elle a été conçue. Nous déduisons à partir des relations de flux représentées sur la FIGURE 4, les fonctions principales :

1. Prévenir la génération du drainage minier acide en contrôlant l'arrivée d'oxygène au niveau des résidus.
2. Maintenir une bonne qualité d'eau sous le système dans le long terme.

Ces fonctions sont liées entre elles. Du fait que la défaillance de la fonction 1 entraîne une mauvaise qualité de l'eau nous pouvons retenir une seule fonction principale : **Prévenir la génération du drainage minier acide en maintenant la barrière à oxygène.**

Les fonctions de contraintes sont obtenues en examinant les milieux extérieurs en interaction avec l'ouvrage. Dans l'application de la CEBC et à partir des milieux extérieurs mis en évidence, nous observons les fonctions de contraintes décrites dans le TABLEAU 4.

TABLEAU 4. Fonctions de contraintes des milieux extérieurs

Milieux	Fonctions de contraintes
Activités anthropiques	Résister aux actions néfastes de l'homme sur le site
Géologie du site	Résister aux ondes sismiques
Topographie	Résister à l'érosion externe ; Résister à l'effet de pente
Nappe phréatique	Résister à la poussée de la nappe
Eau de surface	Résister aux crues
Météorologie	Résister aux cycles de gel-dégel, aux conditions sèches et aux conditions météorologiques extrêmes
Appui (s) latéral	Prévenir l'infiltration d'oxygène à travers les points de contact ; Résister aux forces de glissement ; Résister à l'érosion
Concentration O ₂	Diminuer le flux d'oxygène
Pluie	Recharger le système en eau Résister à l'érosion de surface
Faune	Résister aux actions des animaux fouisseurs
Microorganismes	Résister à l'impact des micro-organismes sur les propriétés hydrogéologiques des matériaux
Végétation	Résister à l'impact de la végétation
Résidus miniers	Résister à la remontée d'eau contaminée

B. Analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle interne examine comment le système est constitué et comment ses constituants interagissent avec le milieu extérieur.

Dans notre contexte, nous cherchons in fine à réaliser une description des mécanismes physiques opérant dans la structure d'une CEBC. Cela implique de prendre en compte :

- Les défaillances des différents composants d'une CEBC ;
- Les mécanismes de vieillissement au niveau des composants ;
- Les effets des défaillances des différents composants sur le système global.

Ainsi, nous avons réalisé une analyse fonctionnelle interne à la granularité intermédiaire.

La décomposition structurelle à la granularité intermédiaire nous a permis d'identifier cinq composants d'une CEBC. Le TABLEAU 5 liste ces composants et la nature de leurs constituants :

TABLEAU 5. Liste des composants, nature des matériaux et ordre de grandeur

Numéro	Composants	Nature	Epaisseur
1	Couche de surface	Sols avec matières organiques	15-20 cm
2	Couche de protection	Sable, gravier, galet, stériles miniers	< 1m
3	Couche de bris capillaire supérieure	Sable, gravier, stériles miniers	30-50 cm
4	Couche de rétention d'humidité	Sols limoneux, argile, résidus miniers	50-100 cm
5	Couche de bris capillaire inférieure	Sable, gravier, stériles miniers	30-50 cm

Afin de mettre en évidence les divers milieux extérieurs qui interagissent avec les différentes couches de la CEBC (composants) et leurs points de contact, nous avons produit des blocs diagrammes fonctionnels pour chaque composant, impliquant les relations de contact et de flux :

- Relation de contact entre les composants et les milieux extérieurs ;
- Relation de contact entre les composants eux-mêmes ;
- La circulation des flux à travers ou à l'intérieur du système (flux bouclé).

Les relations de contact entre les composants et les milieux extérieurs déterminent les fonctions de contrainte de chaque composant. Les relations de contact entre les composants eux-mêmes déterminent les fonctions techniques. Le flux bouclé représente la chaîne fonctionnelle liée à la conception du système. Il illustre la manière dont les trois dernières couches sont interdépendantes, ce qui détermine la fonction technique des composants impliqués dans ce flux. En comprenant les contraintes imposées, nous pouvons déterminer la réaction appropriée de chaque couche (composant) aux milieux extérieurs et les fonctions techniques correspondantes, le cas échéant. Nous présentons à titre d'exemple sur la FIGURE 5 le bloc diagramme fonctionnel du composant « couche de surface ».

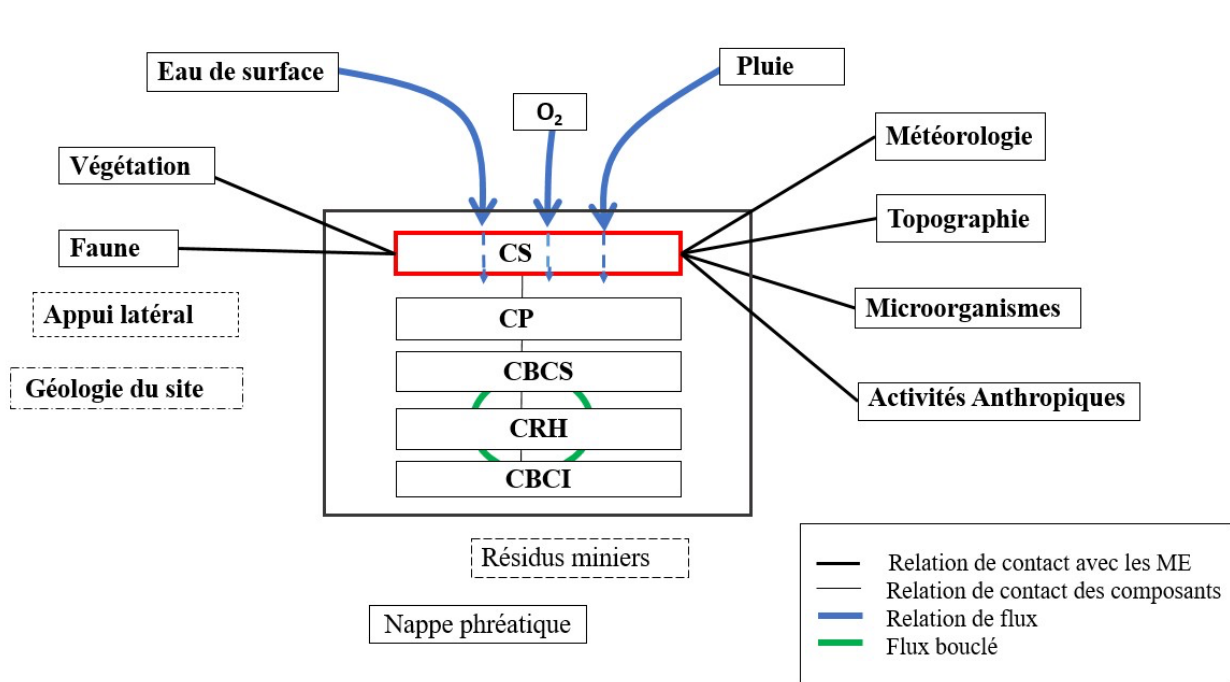


FIGURE 5. Bloc diagramme fonctionnel pour la couche de surface. CS : couche de surface, CP : couche de protection, CBCS : couche de bris capillaire supérieure, CRH : couche de rétention d'humidité, CBCI : couche de bris capillaire inférieure, ME : milieu extérieur.

La relation de contact et de flux entre la couche de surface et les milieux extérieurs se manifeste d'après la FIGURE 5 de la manière suivante : les conditions météorologiques et les précipitations influent sur les processus d'érosion externe et les activités biologiques. La couche doit pouvoir minimiser l'érosion externe. L'érosion peut être atténuée par la végétation, qui apporte de la matière organique favorisant la rétention d'eau et stabilisant le sol en surface, notamment dans les zones de pente. La topographie affecte le ruissellement et la vitesse de l'eau, influençant ainsi l'érosion. L'oxygène et l'eau de surface participent aux processus biologiques et au transport des nutriments, tandis que la macro faune et les microorganismes contribuent à la décomposition de la matière organique, à la formation d'agrégats et à l'aération, autant d'éléments essentiels au maintien de la santé de la couche de surface. Les activités humaines peuvent également influencer cette relation par des pratiques qui altèrent la couche de surface (piétinement, battance). La sylviculture ou la végétalisation assistée peuvent être réalisées par l'homme.

Nous présentons sur la FIGURE 6 ci-dessous le bloc diagramme fonctionnel qui permet de visualiser de manière globale les différentes relations de contacts et de flux traversant les composants d'une CEBC en relation avec les milieux extérieurs.

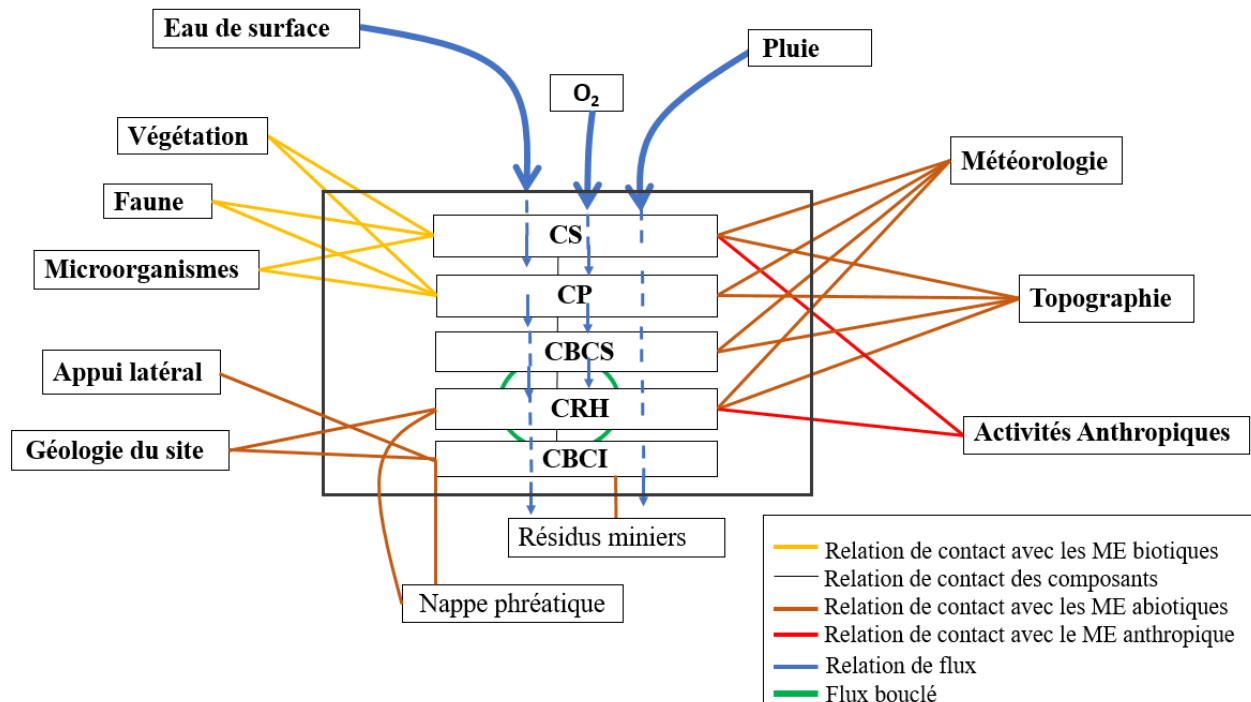


FIGURE 6. Bloc diagramme fonctionnel synthétique d'une CEBC. CS : couche de surface, CP : couche de protection, CBCS : couche de bris capillaire supérieure, CRH : couche de rétention d'humidité, CBCI : couche de bris capillaire inférieure, ME : milieu extérieur.

Suite à l'analyse réalisée à l'aide des différents blocs diagrammes fonctionnels de chaque composant, qui

Suite à l'analyse réalisée à l'aide des différents blocs diagrammes fonctionnels de chaque composant, qui ont permis d'identifier les différentes interactions et flux se produisant au sein d'une CEBC et ses milieux extérieurs, un tableau d'analyse fonctionnelle rassemblant l'ensemble des fonctions de contrainte et technique pour chaque composant a été produit (TABLEAU 6) Au total, 10 fonctions de contraintes et 3 fonctions techniques ont été identifiées.

Les fonctions techniques liées à la CEBC correspondent aux flux se bouclant sur eux-mêmes, engendrés par la conception propre de la CEBC. Cela signifie que les composants impliqués dans ce flux bouclé sont interdépendants et interconnectés pour produire le phénomène des effets de barrière capillaire.

Les fonctions de contrainte liées à la CEBC consistent à gérer les mécanismes externes de détérioration pour garantir son intégrité et sa durabilité. Elles définissent les contraintes imposées par les milieux extérieurs de la CEBC.

TABLEAU 6. Tableau d'analyse fonctionnelle d'une CEBC

N°	Composants	Fonctions de conception	
		Fonctions de contrainte	Fonctions technique
1	Couche de surface	<ul style="list-style-type: none"> • Créer des conditions adéquates pour la végétation • Minimiser l'érosion externe 	
2	Couche de protection	<ul style="list-style-type: none"> • Protéger les couches sous-jacentes contre les effets météorologiques (cycles de gel-dégel, dessiccation) • Contenir/prévenir les agressions externes provenant de la surface 	
3	Couche de bris capillaire supérieure	<ul style="list-style-type: none"> • Stocker temporairement l'eau 	Protéger la couche de rétention contre les pertes par évaporation en créant des effets de barrière capillaire
4	Couche de rétention d'humidité	<ul style="list-style-type: none"> • Minimiser l'impact de suivi et d'exploration hydrogéologique ; • Résister au passage d'ondes sismiques (vibrations) et mouvements de terrain ; • Prévenir l'infiltration d'oxygène à travers les points de contact de la couche avec l'appui latéral. 	Assurer la rétention d'eau (degré de saturation élevé, par exemple supérieur à 85%, afin de diminuer le coefficient de diffusion de l'oxygène)
5	Couche de bris capillaire inférieure	<ul style="list-style-type: none"> • Eviter les remontées capillaires du DMA à partir des résidus miniers en conditions non saturées • Créer une plateforme de travail pour la construction des couches supérieures 	Eviter le drainage par gravité de l'eau de la CRH en créant des effets de barrière capillaire

L'analyse fonctionnelle constitue une étape cruciale dans notre compréhension du système étudié. En identifiant les fonctions globales ainsi que celles de chaque composant, nous avons établi une base solide pour évaluer son fonctionnement et ses performances. Les deux premières couches du système jouent un rôle de protection générale. Elles préservent la chaîne de conception sous-jacente, mettant ainsi en évidence les effets de barrière capillaire. Ces informations nous permettent maintenant de passer à l'étape suivante de notre processus : l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE).

IV. ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE ET DE LEURS EFFETS POUR UNE CEBC

Une Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été réalisée pour l'ensemble des composants du système CEBC.

Le TABLEAU 7 présente un extrait du tableau d'AMDE pour le composant N°1 : « couche de surface ». Pour ce composant, l'AMDE a révélé que la bonne condition de la couche de surface est essentielle pour obtenir un bon recouvrement végétal et une diversité suffisante pour une réhabilitation écologique efficace. Cette couche joue un rôle crucial dans la minimisation de l'érosion externe. De plus, il est important de surveiller les causes potentielles de défaillance de la couche de surface, car elles peuvent déclencher des effets en cascade affectant la stabilité de l'ensemble de la CEBC. Par exemple, des causes telles que la dégradation de la stabilité structurale, la perte de la fertilité du sol ou une épaisseur insuffisante peuvent entraîner un recouvrement végétal inadéquat ou un développement anormal des plantes. Ces problèmes peuvent, à leur tour, provoquer des zones érodées et des accumulations de matériaux. Si ces effets ne sont pas corrigés, ils peuvent s'aggraver et devenir des causes de défaillance de la couche de protection. Nous pourrions alors observer une accélération de la dégradation des propriétés isolantes des matériaux de cette couche, avec des facteurs additionnels tels qu'une épaisseur insuffisante. Cela augmenterait l'exposition des couches sous-jacentes aux effets météorologiques (cycle de gel-dégel), et la couche de protection ne pourrait plus prévenir efficacement les agressions externes en raison du niveau élevé de dommages. La défaillance de la couche de protection augmentera la vulnérabilité de la couche de bris capillaire supérieure. La couche de bris capillaire supérieure verrait alors sa fonction de stockage temporaire de l'eau compromise en raison des défaillances des couches supérieures, entraînant des changements dans la perméabilité, la circulation de l'eau et l'accumulation de matériaux inappropriés, ainsi que l'obstruction des pores de drainage. L'évolution rapide des propriétés des matériaux, due à l'exposition provoquée par la défaillance des autres couches, ainsi que des facteurs tels qu'une épaisseur insuffisante de la couche de bris capillaire supérieure, mettrait en danger la conservation d'eau dans la couche de rétention d'humidité.

Cette méthode appliquée à la CEBC a permis d'identifier de façon exhaustive les causes et les effets possibles de la défaillance de chaque composant, soit au total 37 causes et 18 effets possibles de défaillance. Certaines causes sont communes à tous les composants comme par exemple l'épaisseur d'une couche. D'autres causes sont spécifiques aux 3 composants impliquées dans le phénomène de barrière capillaire, telles que l'évolution des propriétés des matériaux constituant les couches de la CEBC. Ce dernier facteur joue un rôle essentiel dans la dégradation des effets de barrière capillaire. Les causes ont pour origine les flux circulants, les contacts avec les milieux extérieurs, l'état intrinsèque des matériaux constitutifs d'un composant (couche) et le processus de conception ou de réalisation d'un composant. Nous avons distingué les effets sur les flux circulant (eau, oxygène) dans le système, les effets sur les composants du système et l'évolution de l'état intrinsèque d'un composant. Les symptômes sont les manifestations des effets des défaillances.

TABLEAU 7. Tableau AMDE de la couche de surface d'une CEBC

N°	Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Symptôme	Moyen de détection
1	Couche de surface	Créer des conditions adéquates pour la végétation	La fonction « créer des conditions adéquates pour la végétation » est dégradée ou défaillante	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation de la stabilité structurale du sol (battance et compaction du sol ; perte de matière organique) Mauvaise aération de la couche (excès d'eau) Perte de la fertilité du sol (pauvre en nutriments ; déséquilibre nutritif, pH) Dégradation de la chimie du sol (acidification et salinisation) Changement climatique (variation des températures, des précipitations, événements météorologiques extrêmes) Activités anthropiques (élevage ; activités récréatives) Contamination du sol (métaux lourds ; produits chimiques organiques) 	Recouvrement anormal de la végétation	Indice de couverture végétale	Observation visuelle
				<ul style="list-style-type: none"> L'épaisseur insuffisante de la couche ne fournit pas un milieu de croissance adéquat pour le développement racinaire (erreur de conception ; mauvaise exécution ; changement climatique) 	Développement anormal ; déracinement (chablis)	Profondeur d'enracinement Mesure de l'épaisseur	Observation visuelle

V. CONCLUSION

L'analyse systémique d'une CEBC réalisée dans cette étude s'est basée sur les méthodes de la sûreté de fonctionnement : l'analyse fonctionnelle basée sur la méthode APTE et AMDE.

L'analyse fonctionnelle, nous a permis d'obtenir une description précise de l'ouvrage, de ses composants et des liens entre eux et avec les milieux extérieurs. Cela a impliqué la décomposition du système en ses différents composants et l'analyse des fonctions spécifiques de chacun. Les informations obtenues par l'analyse fonctionnelle ont servi de base à l'application de AMDE.

L'étape d'AMDE, nous a permis d'identifier les modes de dysfonctionnement potentiels, leurs causes sous-jacentes et leurs impacts. Cette approche a révélé des points critiques nécessitant une attention particulière, tels que l'intégrité des matériaux utilisés et l'importance de respecter les épaisseurs des couches de matériaux de chaque composant pour assurer l'efficacité de la CEBC. En ce sens, cette approche pourrait également être utilisée pour améliorer la conception des CEBC, en plus du suivi post-construction. D'autre part, la santé et la diversité du peuplement végétal présent a également été identifié comme symptôme.

L'analyse systémique présentée dans cet article a ainsi permis de formaliser le fonctionnement d'une CEBC et d'identifier ses dysfonctionnements pour optimiser son suivi et son entretien à long terme.

La prochaine étape de cette étude consistera à représenter les scénarios de défaillance certainement sous la forme d'arbres (arbre de défaillances ou arbre d'évènements). La représentation des scénarios de défaillance sous forme d'arbre permet une meilleure visualisation des scénarios et des enchaînements évènements. Elle permet de mettre en évidence les combinaisons d'évènements dépendants et indépendants formant les scénarios de défaillance.

Enfin, cette analyse systémique représente une étape importante dans notre perspective de développer une méthode d'évaluation de la performance d'une CEBC à partir par exemple, de méthodes telles que les méthodes d'aide à la décision multicritère.

REFERENCES

- Aachib, M., Mbonimpa, M., Aubertin, M., 2004. Measurement and Prediction of the Oxygen Diffusion Coefficient in Unsaturated Media, with Applications to Soil Covers. *Water Air Soil Pollut* 156, 163–193. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000036803.84061.e5>
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., 2002. *Environnement et gestion des rejets miniers*. Les Editions de l'École Polytechnique de Montréal, Montreal, QC, Canada.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.F., Tremblay, L., 1995. *Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers (Project CDT P1622. CD-ROM. Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), No. NEDEM/MEND Report 2.22.2a)*. Ecole Polytechnique de Montreal, Ottawa, Ont.
- Bambara, G., 2016. *Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente*. (Ph.D thesis). Aix-Marseille University.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jamboor, J.L., Weisner, C.G., Paktunc, D., Gould, W.D., Johnson, D., 2014. 11.5 - The geochemistry of acid mine drainage, in: *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier, pp. 131–190.
- Bussière, B., Aubertin, M., Chapuis, R.P., 2003. The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Can. Geotech. J.* 40, 512–535. <https://doi.org/10.1139/t03-001>
- Bussière, B., Guittonny, M. (Eds.), 2020. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781315166698>

- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Bussière, B., Cyr, J., 2005. Performance of the Lorraine mine site cover to limit oxygen migration. 2005 SME Annual Meeting: Got Mining - Preprints 318, 843–857.
- Gouvernement du Québec, 2024. Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec, Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. ed.
- Guittouy, 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.).
- Laroche, O., 2011. Revégétalisation de sites miniers et valorisation de boues de stations d'épuration : cas de la Nouvelle-Calédonie (Essai). Université de Sherbrooke.
- Lundgren, T., 2001. The dynamics of oxygen transport into soil covered mining waste deposits in Sweden. *Journal of Geochemical Exploration* 74, 163–173. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00182-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00182-0)
- MEND, 2004. Design, Construction and Performance Monitoring of Cover Systems for Waste Rock and Tailings (No. Report No. 2.21.4). Canada Center for Mineral and Energy Technology, Canada.
- Morel-Seytoux, H.J., 1993. Dynamic Perspective on the Capillary Barrier Effect at the Interface of an Upper Fine Layer with a Lower Coarse Layer. Presented at the Engineering Hydrology, ASCE, pp. 467–472.
- Nicholson, R., Gillham, R.W., Cherry, J.A., Reardon, E.J., 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal* 26, 1–8. <https://doi.org/10.1139/t89-001>
- Peyras, L., 2003. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages (These de doctorat). Clermont-Ferrand 2.
- Proteau, A., Guittouy, M., Bussière, B., Maqsoud, A., 2021. Impact of Roots on Hydrogeological Parameters Supporting the Performance of a Cover with Capillary Barrier Effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 147, 04021069. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002562](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002562)
- Proteau, A., Guittouy, M., Bussière, B., Maqsoud, A., 2020a. Aboveground and Belowground Colonization of Vegetation on a 17-Year-Old Cover with Capillary Barrier Effect Built on a Boreal Mine Tailings Storage Facility. *Minerals* 10, 704. <https://doi.org/10.3390/min10080704>
- Proteau, A., Guittouy, M., Bussière, B., Maqsoud, A., 2020b. Oxygen migration through a cover with capillary barrier effects colonized by roots. *Can. Geotech. J.* 57, 1903–1914. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0515>
- Serre, D., 2005. Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations : modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique (These de doctorat). Université de Marne-la-Vallée (1991-2019).
- Smirnova, E., Bussière, B., Tremblay, F., Bergeron, Y., 2011. Vegetation Succession and Impacts of Biointrusion on Covers Used to Limit Acid Mine Drainage. *Journal of Environmental Quality* 40, 133–143. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0051>
- Vuillet, M., 2012. Élaboration d'un modèle d'aide à la décision probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales (PhD Thesis). Paris Est.
- Yanful, E., Bell, A., Woysner, M., 1993. Design of a composite soil cover for an experimental waste rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J* 30, 578–587. <https://doi.org/10.1139/t93-050>
- Zwingelstein, G., 1995. Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels. Hermès.

REMERCIEMENTS

L'équipe projet tient à remercier chaleureusement Bruno BUSSIERE de l'institut de recherche des mines et environnement (IRME), Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) Canada, pour sa participation et l'apport de son expertise lors des séances de validation de l'analyse systémique produite (analyse fonctionnelle et analyse des modes de défaillance et de leurs effets d'une CEBC).