

Mémoire de fin d'études: Matériaux géosourcés: exploration de leur potentiel dans une approche régénérative du territoire

Auteur : Djike, Daniel Gebin

Promoteur(s) : Possoz, Jean-Philippe; Courard, Luc

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24199>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

UNIVERSITÉ DE LIÈGE – FACULTÉ D’ARCHITECTURE

**MATÉRIAUX GÉOSOURCÉS: EXPLORATION DE LEUR POTENTIEL DANS
UNE APPROCHE RÉGÉNÉRATIVE DU TERRITOIRE.**

Travail de fin d’études présenté par Daniel G. DJIKE en vue de l’obtention
du grade de Master en Architecture

Sous la direction de Jean-Philippe POSSOZ
et Luc COURARD

Année académique 2024-2025

Remerciements

La réalisation de ce travail a été rendue possible grâce à l'accompagnement précieux de Monsieur POSSOZ et Monsieur COURARD, qui ont accepté d'en assurer la direction. Leur écoute attentive, leur patience et leur disponibilité lors des échanges et réunions ont constitué un cadre favorable au bon déroulement de la recherche. Par leurs interventions régulières, ils ont constamment apporté une valeur ajoutée à cette étude, offrant un soutien quotidien ainsi qu'une compréhension profonde des enjeux.

Les remerciements s'adressent également aux professeurs Martina BARCELLONI CORTE et Karel WUITACK, dont les conseils avisés et les observations ont permis de guider l'avancement du projet.

Un remerciement particulier est adressé aux membres du groupe de projet avec lesquels la collaboration a enrichi l'élaboration de ce travail dans le cadre de l'atelier « Architecture régénérative ».

La gratitude va aussi à Monsieur TOURNEUR pour la transmission de documents et références ayant considérablement nourri la recherche.

Enfin, une pensée toute spéciale revient à ma famille, dont le soutien indéfectible a offert les conditions nécessaires à une réalisation sereine de ce mémoire. Un remerciement sincère est particulièrement destiné à mon grand frère et à ma belle-sœur, pour leur appui constant tout au long de ce parcours.

Résumé

Dans un contexte de crise environnementale et de pression croissante sur les ressources naturelles, ce travail de fin d'études explore le potentiel des matériaux géosourcés (comme la terre crue ou la pierre) dans une approche régénérative du territoire. L'étude interroge le modèle extractif actuel, à la fois énergivore, destructeur d'écosystèmes et déconnecté des dynamiques locales, en proposant une alternative fondée sur une exploitation raisonnée, territorialisée et à faible impact. À travers une analyse critique des enjeux économiques, sociaux et écologiques liés à l'extraction minière, ce travail cherche à revaloriser les ressources géosourcées dans le secteur de la construction. Il s'appuie sur une lecture du territoire de la vallée de la Sambre (Wallonie), marqué par un passé extractif dense et des friches porteuses de potentiel. L'objectif est de concevoir un projet de territoire intégrant les matériaux géosourcés comme vecteurs d'une transformation architecturale et paysagère, capable de réconcilier impératifs constructifs et respect des milieux vivants. L'approche mobilisée repose sur les principes de l'architecture régénérative, qui ne se limite pas à atténuer les impacts, mais vise à restaurer et renforcer les écosystèmes en plaçant l'humain au cœur d'un processus de coévolution avec son environnement. Ce travail pose ainsi la question suivante : comment repenser l'exploitation et l'usage des matériaux géosourcés afin de concilier les besoins du secteur de la construction avec les exigences écologiques et sociales contemporaines ? Les résultats attendus visent à proposer des scénarios d'aménagement intégrés, des stratégies de relocalisation de la filière, et des outils pour structurer un usage durable, culturellement ancré et écologiquement responsable des ressources géosourcées dans la fabrique architecturale et territoriale.

Usage de l'intelligence artificielle

Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, les outils d'intelligence artificielle tels que ChatGPT et Perplexity ont été mobilisés en tant qu'assistants dans le processus d'élaboration du contenu. Leur utilisation a principalement consisté à reformuler certains passages afin d'améliorer la fluidité rédactionnelle, d'harmoniser la terminologie employée et de structurer les transitions entre les différentes sections du document. Par ailleurs, DeepL IA a été employé pour la traduction de documents scientifiques rédigés en langues étrangères, notamment en anglais et en italien, facilitant ainsi l'accès à une documentation scientifique plus diversifiée et complète.

Il convient de souligner que les propositions générées par ces outils ont systématiquement fait l'objet d'une évaluation critique rigoureuse. Toute suggestion issue de l'intelligence artificielle a été révisée et, si nécessaire, modifiée afin de garantir la cohérence, la rigueur scientifique et la pertinence du contenu. L'ensemble des analyses, idées et choix méthodologiques demeure sous la responsabilité exclusive de l'auteur, assurant ainsi l'intégrité intellectuelle et la qualité du travail.

Remerciements	1
Résumé.....	2
Usage de l'intelligence artificielle	3
Partie 1 – Fondements théoriques : extraction minérale, enjeux et alternatives	6
1.Introduction	7
1.1. Les enjeux liés à l'exploitation des ressources	7
1.2. Contexte de la recherche	9
1.3. Objectif de la recherche	12
1.4. Question de recherche.....	12
1.5. Méthodologie	13
2. Ressources minérales et activité extractive : comprendre les enjeux	15
2.1. Définition des ressources minérales et des matériaux géosourcés.....	15
2.2. Disponibilité, usage et standardisation des ressources	18
2.3. Types et fonctionnement des exploitations	21
2.4. Avantages économiques, sociaux et territoriaux	26
2.5. Désavantages sociaux, économiques et environnementales	29
2.6. Vers une approche intégrée et territoriale	33
2.7. Matériaux à faible impact et économie circulaire.....	34
3. Les sols et les terres comme matériaux en architecture	36
3.1. Terminologie : sol vs terre.	36
3.2. Formation et constitution des sols.....	37
3.3. Histoire des terres à bâtir	39
3.4. Propriétés, identification et techniques de mise en œuvre des terres à bâtir.....	41
3.5. Stabilisation de la terre crue.....	47

Partie 2 – Enquête territoriale et stratégie de projet	53
4. Analyse du territoire du bassin versant de l’Orneau	54
4.1. Ressources géologiques et potentiel extractif.....	54
4.2. Formes d’exploitation et transformation du paysage.....	61
4.3. Patrimoines oubliés et héritages fragmentés.....	69
5. Enjeux territoriaux.....	74
5.1. Enjeux hydriques	74
5.2. Fragmentation écologique et biodiversité.....	76
5.3. Croissance démographique et besoins en matériaux	78
5.4. Superposition des enjeux	81
6. Scénarios d’extraction régénérative.....	84
6.1. Scénario 1: l’extraction comme outil d’aménagement du territoire	84
6.1.1. Renforcer les continuités écologiques.....	88
6.1.2. Valoriser les traces du passé extractif.....	91
6.2. Scénario 2 : l’extraction concertée comme levier de résilience territoriale.....	94
6.2.1. Îlots de chaleur et ruissellement.....	94
6.2.2. Carrière et adaptation territoriale	98
7. Hypothèses d’usage des matériaux géosourcés extraits	109
7.1. Stratégies de gestion et circularité territoriale	110
7.2. Applications en construction.....	112
7.3. Expérimentations et mise en évidence du potentiel.....	114
Conclusion	119
Bibliographie.....	120
Liste des figures	128

Partie 1 – Fondements théoriques : extraction minérale, enjeux et alternatives

1.Introduction

1.1. Les enjeux liés à l'exploitation des ressources

La relation entre les sociétés humaines et les ressources minérales s'inscrit dans une histoire longue de plus de 40 000 ans, profondément enracinée dans l'évolution des civilisations. Dès la Préhistoire, les premiers groupes humains ont su tirer parti de la matière minérale, façonnant le silex ou l'obsidienne pour créer des outils de chasse et de défense (Jébrak & Marcoux, 2008). Cette capacité à transformer la matière a marqué le début d'un rapport fondamental entre l'humain et les ressources naturelles. Les grandes périodes de l'histoire (âge de pierre, du cuivre, du bronze, puis du fer) témoignent de cette évolution conjointe entre les sociétés humaines et les matériaux, au cours de laquelle les ressources extraites du sol ont structuré les modes de vie, les architectures des villages, les économies et les systèmes de production (Jébrak & Marcoux, 2008). Selon le centre de recherche en écologie Etopia (2010), les ressources minérales demeurent aujourd'hui au cœur de notre quotidien, bien que leur présence soit souvent occultée. Des objets du quotidien (comme le dentifrice, des carreaux de sucres), jusqu'aux filières industrielles complexes telles que (l'aéronautique, la construction, l'automobile), dépendent d'une grande variété de matériaux issus de notre sous sol (Etopia, 2010). Roches, métaux, sables, argiles, calcaires, silices, composent les fondements matériels de notre société contemporaine.

Cependant, cette dépendance s'inscrit dans un contexte de tension croissante. L'augmentation continue de la population mondiale, bien que sujette à des incertitudes à long terme, implique mécaniquement une hausse de la demande en matériaux pour construire des logements, développer les infrastructures ou produire des biens (CGDD, 2025). Mais au-delà de la démographie, c'est aussi l'intensification de la consommation par habitant qui accélère cette pression et se traduit par une exploitation toujours plus massive des ressources naturelles: besoin accru de mobilité, d'alimentation transformée, de technologies, de confort résidentiel... Selon le groupe international d'experts sur les ressources (GIER, ou IRP pour *International Resource Panel*), l'extraction mondiale de matières premières a plus que triplé entre 1970 et 2017, passant de 27 à 92 milliards de tonnes. Cette croissance concerne principalement les minéraux non métalliques utilisés majoritairement dans le secteur de la construction (CGDD, 2025). Comme le présente le diagramme de la figure1, ces minéraux non métalliques, non renouvelables (en bleu), représentaient déjà près de 50 % des extractions mondiales en 2020. Si la tendance se poursuit, le volume total pourrait atteindre environ 225 milliards de tonnes d'ici 2060, dont 60 % seraient destinés à la construction (CGDD, 2025). Une telle trajectoire révèle une contradiction fondamentale entre la demande croissante de matière première et le caractère fini des ressources minérales, accentuant les tensions sur les stocks disponibles et les écosystèmes associés (Makinson, 2024).

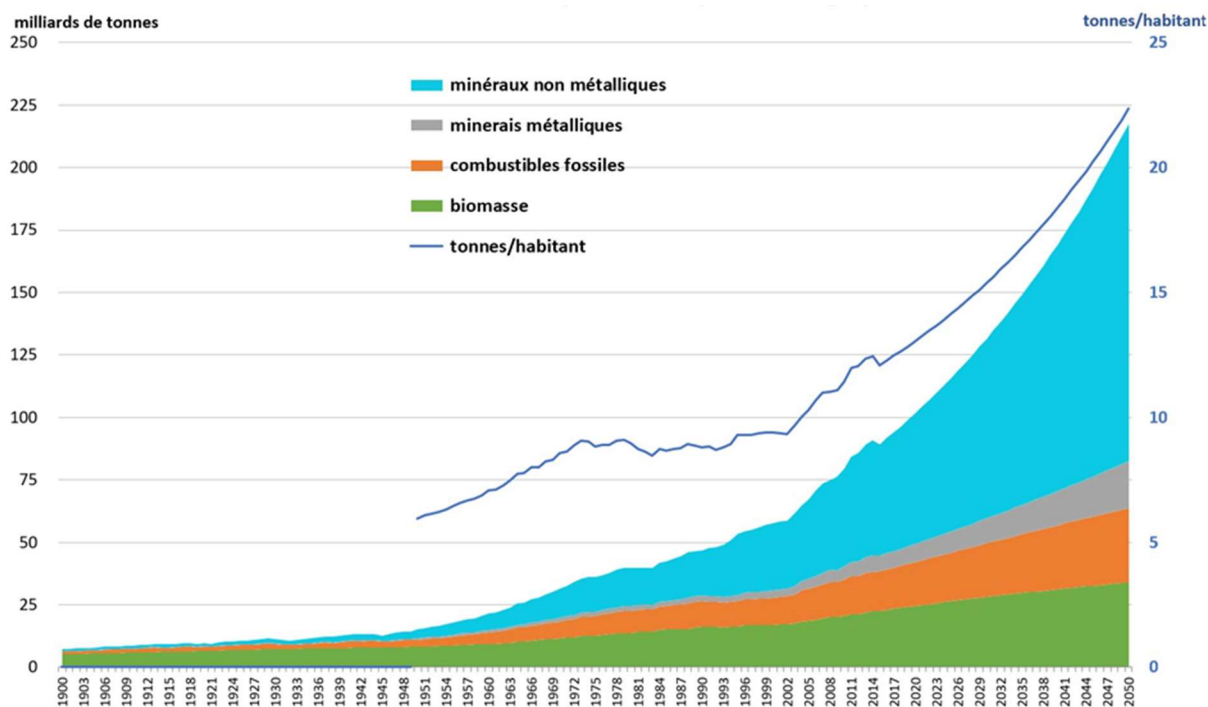


Figure 1. Extraction mondiale de matières premières depuis 1900 et projection 2050. Crédits : Source : Krausmann et al., 2018.

Depuis la révolution industrielle, l'entrée dans l'Anthropocène (cette ère géologique marquée par l'empreinte prédominante de l'activité humaine sur la planète), donne une nouvelle dimension au débat. L'impact global des modes de vie modernes sur les systèmes terrestres est désormais reconnu comme un facteur majeur de déséquilibre écologique (Jébrak & Marcoux, 2008). Dans nos sociétés européennes contemporaines, immergées dans un univers dominé par le béton, l'acier et les matériaux composites, la conscience de l'origine des matériaux que nous utilisons tend à s'effacer. L'industrialisation et l'urbanisation ont progressivement éloigné les citoyens des processus d'extraction, reléguant les carrières et les mines à des zones périphériques ou étrangères, comme le mentionne Yans (2015). Pourtant, la consommation de ces ressources continue d'augmenter, en dépit de la distance physique et mentale qui nous sépare de leur provenance (Yans, 2015). Lorsqu'elle est évoquée, l'exploitation de ressource suscite généralement une réaction de rejet, motivée par ses innombrables effets néfastes visibles sur l'environnement local, mais également par ses impacts plus diffus, mais tout aussi réels (Makinson, 2024). Ces nuisances alimentent une opposition croissante, parfois qualifiée de phénomène « NIMBY » (Not In My Back Yard), où l'on accepte la nécessité d'extraire, mais à condition que cela se passe ailleurs (Poskin, 2010).

L'exemple de la Wallonie illustre bien cette dynamique. Alors qu'on y recensait encore environ 700 sites d'extraction en 1972, il n'en restait qu'environ 150 à 160 en activité selon les données actualisées depuis 2006 (Poty & Chevalier, 2006). Les carrières souterraines ont connu un déclin encore plus marqué, passant de plus de 400 en 1913 à une seule aujourd'hui (Poty & Chevalier, 2006). Contrairement à ce que l'on pourrait croire, cette diminution n'est pas due à un épuisement des gisements exploitables, mais à une combinaison de facteurs économiques, environnementaux et sociaux (Yans, 2015). Tels que la baisse de compétitivité de certaines ressources, le déplacement des activités extractives vers des régions moins réglementées et plus riches en matières premières, la recherche de gisements à haute pureté, ainsi qu'une volonté

accrue de préserver les paysages, la biodiversité et le cadre de vie. À cela s'ajoutent les mobilisations citoyennes et le renforcement des normes environnementales.(Poskin, 2010).

Cette délocalisation a entraîné une dissociation entre l'exploitation des ressources et leur consommation finale. Pour la plupart des citoyens européens, les impacts économiques, sociaux et environnementaux de l'extraction minière se produisent loin, souvent à des milliers de kilomètres. Selon Yans (2015), ce décalage spatial entretient une ignorance générale quant au caractère limité des ressources géologiques et contribue à une certaine indifférence face aux enjeux socio-environnementaux de l'extraction, pourtant de plus en plus préoccupants à l'échelle mondiale. Pourtant, malgré ces avertissements, certains secteurs clés comme celui de la construction n'ont intégré que tardivement ces préoccupations dans leurs pratiques (CGDD, 2025). Cela crée aujourd'hui un paradoxe : alors que les impacts écologiques de l'extraction deviennent de plus en plus visibles, les réponses institutionnelles, industrielles et architecturales tardent encore à se structurer autour d'une réelle transformation des modèles de production et d'usage des ressources.

1.2. Contexte de la recherche

Ce travail de fin d'études prend racine dans un intérêt initial pour la construction en terre, envisagée dans un contexte contemporain en Afrique. Ce point de départ reposait sur un double a priori : la disponibilité de la ressource sur place, et l'existence de traditions constructives anciennes encore actives. Mais cette posture, s'inscrivait dans une approche trop générale, sans ancrage territorial ni social suffisamment précis. Cependant, la volonté de réaliser un TFE-projet nous a amenée à intégrer le cadre de l'atelier "Architecture régénérative", conçu comme un laboratoire exploratoire ancré dans un territoire spécifique : **la vallée de la Sambre**. Ce choix a constitué un véritable tournant méthodologique. Il a exigé une reformulation progressive de ma question de recherche, rendue nécessaire par la confrontation à un contexte local bien différent, où les ressources disponibles et les traditions constructives ne sont ni évidentes, ni directement mobilisables.

Inspirée de la méthode de recherche par le projet décrite par Foissac et al. (2022), notre démarche ne s'appuie plus sur des certitudes figées ou des héritages incontestés. Elle se construit comme une enquête visant à observer, questionner et analyser les dynamiques du territoire étudié, tout en suspendant, de manière temporaire, certaines hypothèses formulées en amont. Ce recentrage territorial a ouvert une réflexion plus large sur les matériaux locaux non seulement en tant que leviers potentiels de transition écologique, mais aussi comme éléments actifs des dynamiques locales existantes. En interrogeant la matière dans sa relation au sol, au climat, aux pratiques constructives et modes de vie, cette réflexion croise les logiques propres à l'architecture vernaculaire. L'architecture vernaculaire apparaît alors non pas comme un modèle du passé à reproduire, mais comme une forme d'intelligence territoriale longtemps expérimentée, où construire signifiait avant tout composer avec son environnement (Varin, 2011). Cela témoigne d'un lien organique entre le sol, le climat, la matière et les modes de vie : les matériaux n'étaient pas choisis pour leur performance isolée, mais parce qu'ils étaient en

résonance avec un lieu, une culture, une manière d'habiter (Varin, 2011). Les gestes constructifs, les formes bâties, les usages étaient le fruit d'un ajustement constant entre les besoins humains et les conditions du milieu (Varin, 2011). Cette logique d'adaptation, transmise au fil du temps par l'expérience et le savoir-faire, repose sur un rapport actif et sensible à l'environnement, dans lequel le bâti n'est pas extérieur à l'écosystème, mais en fait pleinement partie.

Cette approche rejoint les principes fondamentaux de l'architecture régénérative. Qui vise quant à elle, à dépasser la simple logique de réduction des impacts environnementaux, et s'inscrit dans une dynamique cherchant à intégrer le cadre bâti dans un processus continu de réparation et d'amélioration des écosystèmes, où les activités humaines ne sont plus dissociées de leur environnement, mais pensées comme des composantes actives de celui-ci (Lyle, 1994). L'architecture régénérative cherche à réparer les écosystèmes, à renforcer la résilience des milieux, et à inscrire l'acte de construire dans une logique de coévolution entre humains et milieux vivants (Armstrong, 2023). Dans cette optique, l'architecture ne s'impose pas au territoire : elle s'en inspire, s'y adapte, et y contribue à son évolution (Lyle, 1994).

Le bassin versant de la Sambre (*figure 2*), en Wallonie, constitue un terrain d'étude particulièrement pertinent pour interroger les liens entre ressources locales et dynamiques territoriales. Marqué par une longue histoire d'exploitation des matériaux du sous-sol (pierre, argile, sable) ce territoire conserve de nombreuses traces tangibles de son passé extractif : carrières désaffectées, friches industrielles, infrastructures abandonnées, mais aussi bâtiments construits à partir de matériaux issus du sol (Poskin, 2010). Ce contexte offre ainsi un cadre propice pour analyser comment les ressources locales ont historiquement influencé les modes de construire, les formes urbaines et les modes de vie. Il permet aussi d'interroger, à partir de ces héritages, comment imaginer d'autres manières de faire territoire, plus adaptées aux défis contemporains. Dans un moment marqué par la pression démographique, la raréfaction des ressources et la demande croissante en équipements (StatBel, 2024), le bassin versant de la Sambre apparaît comme un terrain fertile pour explorer les potentialités des ressources locales.

Le bassin versant de la Sambre:
Réseaux hydrographique et relief

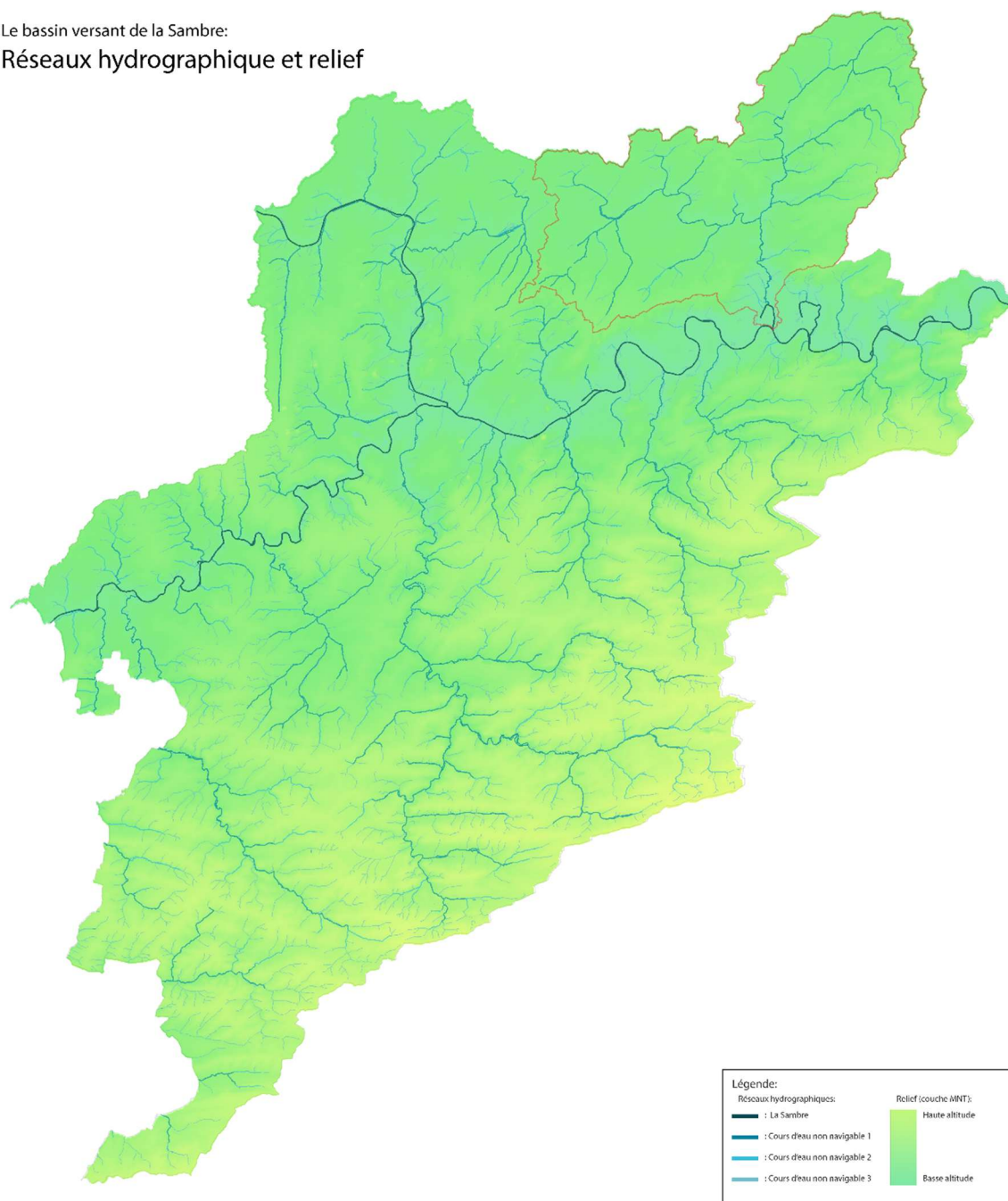


Figure 2. Le Bassin versant de la Sambre. Crédit : CRSA, Projet Interreg DIADeM

1.3. Objectif de la recherche

Face à ce constat, une remise en question du modèle extractif actuel s'impose. Il devient urgent de réfléchir à une transition vers des modes d'exploitation plus durable. Cela implique non seulement de repenser les pratiques industrielles, mais aussi de redéfinir la place de l'extraction dans notre société, en intégrant les notions de durabilité. Il est toutefois illusoire d'imaginer une société sans extraction. Ces ressources sont profondément ancrées dans notre quotidien, dans nos infrastructures, nos technologies et nos objets les plus ordinaires (Makinson, 2024). L'enjeu n'est donc pas de renoncer à l'extraction, mais d'en transformer les modalités, afin d'en minimiser les impacts tout en assurant la pérennité de nos systèmes productifs (Makinson, 2024). Cependant, relancer l'extraction sans en interroger les modalités serait contre-productif. À l'inverse, continuer à dépendre des importations revient à externaliser les impacts vers d'autres territoires, souvent plus vulnérables, tout en aggravant les pressions écologiques et géopolitiques liées aux ressources.

Dans un contexte de transition vers un approvisionnement durable, c'est-à-dire une manière de se procurer les ressources en minimisant les impacts écologiques, en respectant les écosystèmes et les populations locales, et en assurant la viabilité à long terme des matériaux, repenser nos manières de construire suppose une remise en question profonde des ressources mobilisées et de leurs modes d'extraction, de transformation et d'usage (Prugnard, 2024). Face à ces impasses, ce travail de recherche-projet propose d'explorer une voie de transition régénérative, à la fois territorialisée et sensible aux milieux. Il s'agit de réinterroger les ressources locales, les pratiques constructives, les héritages paysagers, et les usages futurs dans une logique de cohabitation et de réciprocité. En valorisant les potentiels latents du territoire, cette démarche ouvre la possibilité de concevoir des paysages vivants, inclusifs, et porteurs de durabilité.

1.4. Question de recherche

Dans un contexte où les pressions sur les ressources naturelles s'intensifient et où les limites du modèle extractif dominant deviennent de plus en plus visibles, cette recherche s'inscrit dans une volonté d'explorer des alternatives plus résilientes et localisées. Le recours aux matériaux locaux apparaît comme une piste prometteuse. Leur usage historique dans les architectures vernaculaires témoigne d'une intelligence constructive étroitement liée au territoire, où la matière n'était pas simplement utilisée, mais habitée, intégrée à une culture, un climat et un mode de vie.

Il ne s'agit pas ici d'un simple retour aux pratiques du passé, mais d'une réactualisation critique de ces logiques dans une perspective régénérative. Cette approche invite à repenser les ressources géosourcées non seulement comme une réponse technique aux enjeux environnementaux, mais comme des vecteurs de transformation systémique, capables d'inscrire l'architecture dans un rapport renouvelé au sol, au paysage et aux communautés.

La question centrale qui guide cette recherche est donc la suivante :

Comment repenser l'exploitation et l'usage des matériaux géosourcés afin de concilier impératifs écologiques, dynamiques locales et besoins du secteur de la construction ?

Cette réflexion s'articule autour de plusieurs axes d'analyse :

- Quels sont les matériaux géosourcés disponibles sur le territoire, et comment ont-ils historiquement façonné les pratiques constructives, les formes bâties et les relations entre matière, environnement et société ?
- Comment assurer un approvisionnement durable en matériaux de construction tout en limitant les impacts de l'extraction sur les écosystèmes et les territoires ?
- Quelles conditions permettraient l'émergence d'une filière locale structurée autour des matériaux géosourcés, mobilisant artisans, carriers, acteurs publics et habitants ?
- En quoi le recours aux exploitations locales peut-il contribuer à répondre aux enjeux environnementaux contemporains, notamment en matière de résilience territoriale ?

1.5. Méthodologie

La recherche proposée ici mobilise la recherche par le projet comme méthode principale, en lien étroit avec le cadre de l'atelier "Architecture régénérative" et avec le terrain de la vallée de la Sambre. Cette méthode offre un potentiel important pour les sujets qui cherchent à articuler la théorie à des pratiques situées, dans une logique d'allers-retours entre réflexivité, observation, et création. Elle permet également une certaine souplesse méthodologique, essentielle pour s'adapter à un terrain évolutif, porteur d'inattendus, et pour laisser émerger des hypothèses au fil de l'enquête. Dans ce travail, le projet n'est pas envisagé comme une simple application d'idées préalablement formulées, mais comme un véritable outil d'investigation, susceptible de produire de la connaissance, de révéler les potentialités d'un lieu, d'expérimenter des pistes de transformation et d'action. À ce titre, il s'inscrit dans une approche transversale, où la démarche théorique et la démarche de projet se nourrissent mutuellement.

Le présent travail se structure donc en deux parties complémentaires, étroitement articulées.

Partie 1 – Fondements théoriques

Cette première partie de la recherche vise à établir les fondements conceptuels du travail en mettant en discussion les notions clés liées à la question de recherche. L'objectif est de confronter ces notions aux réalités locales afin de construire de façon progressive une question de recherche contextualisée. Cette approche s'inscrit dans la perspective d'une théorie située, élaborée à partir du terrain (Findeli, 2007).

Ce cadre théorique s'est construit progressivement en plusieurs étapes complémentaires, nourrit par les questions que le terrain d'étude a fait émerger et qui ont nécessité une appropriation de savoirs spécifiques. :

- Une exploration documentaire permettra de comprendre les dynamiques générales de l'extraction minière. Cette approche élargie vise à saisir le rôle de ces ressources dans la

vie quotidienne, ainsi que les enjeux sociaux, économiques et environnementaux qu'elles soulèvent.

- L'étude se recentre ensuite sur une recherche ciblée sur les matériaux géosourcés, notamment la terre crue comme matériau de construction, afin d'explorer son potentiel dans une perspective de transition. L'étude portera sur sa composition, ses propriétés physiques, ses conditions de formation, ainsi que sur les techniques qui permettent de l'utiliser en architecture tout en préservant son caractère local, naturel et faiblement transformé.

Partie 2 – Enquête territoriale et élaboration du projet

La seconde partie est centrée sur le travail de terrain, conçu comme un dispositif d'enquête active. Il s'est structuré en plusieurs échelles successives visant à décrypter les spécificités du territoire, ses héritages extractifs, ses ressources enfouies ou négligées, et les enjeux contemporains qui le traversent. Cette enquête s'est organisée selon quatre axes principaux :

- Étude des sols et des ressources géologiques disponibles: qualité, quantité, accessibilité, usages passés ou actuels
- Analyse des exploitations historiques : carrières, sablières, friches industrielles et de leur empreinte sur le paysage
- Identification des enjeux contemporains: pression foncière, reconversion, stress hydrique, biodiversité
- Lecture des potentialités d'évolution.

Le projet émerge ainsi comme une réponse située : à la fois ancrée dans les réalités du terrain et porteur de transformation. Il vise à formuler des pistes concrètes pour réconcilier exploitation des ressources locales et revitalisation du territoire, dans une logique régénérative.

2. Ressources minérales et activité extractive : comprendre les enjeux

2.1. Définition des ressources minérales et des matériaux géosourcés

Dans une époque marquée par l'urgence écologique, le secteur de la construction est invité à revisiter ses pratiques, à commencer par ses choix de matériaux. Cette réflexion passe par une compréhension précise des **ressources naturelles** utilisées dans le bâtiment, en particulier celles issues du sol et du sous-sol. Pour bien saisir la place des **matériaux géosourcés** dans cette dynamique, il est nécessaire de les situer dans la grande famille des **ressources géologiques**, dont ils ne représentent qu'une fraction (Ayudhia, 2015).

Le terme de **ressource géologique** désigne « l'ensemble des éléments solides, liquides ou gazeux présents dans la croûte terrestre, que ce soit en surface ou en profondeur, et dont la concentration et les caractéristiques permettent une exploitation potentiellement pour répondre aux besoins humains » (Ayudhia. 2015). Ces ressources comprennent les roches, les minéraux, les sols, les eaux souterraines, les gaz, et les sources d'énergie géothermiques (Ayudhia. 2015). Elles sont exploitées depuis des millénaires, bien que leur définition précise fasse encore débat au sein de la communauté scientifique.

Dans le langage courant, on confond fréquemment les termes "**roche**" et "**minéral**", pourtant, du point de vue scientifique, ils sont bien distincts. Un minéral est une substance naturelle, généralement solide, formée par des processus géologiques, dotée d'une composition chimique définie et d'une structure cristalline ordonnée (Deluzarche, 2021). Une roche, en revanche, est un agrégat naturel composé d'un ou plusieurs minéraux. Par exemple, le granite est une roche constituée de quartz, de feldspath et de mica, trois minéraux distincts (Deluzarche, 2021). Cette distinction fondamentale est à la base des classifications géologiques et conditionne les usages potentiels dans la construction. Cependant il existe également le terme **minerai**, qui fait référence à « toute roche suffisamment riche en minéraux pour être exploitable » (Deluzarche, 2021). Par extension, on utilise le terme minerai pour désigner les minéraux exploités (or, uranium, fer...). Il s'agit donc plus d'un terme économique que géologique.

Parmi les ressources géologiques, on distingue un sous-ensemble crucial pour les activités humaines : les **ressources minérales**. Celles-ci regroupent les substances solides extraites pour leur intérêt économique, comme les minerais métalliques, les minéraux industriels, les gemmes, les ressources énergétiques solides et les matériaux de carrière (Jébrak & Marcoux, 2008). Selon l'Institut canadien des mines, une ressource minérale est « une concentration de matière solide présente dans la croûte terrestre, dont la forme, la teneur et la quantité permettent d'envisager une extraction rentable à terme » (CIM, 2014). En fonction des disciplines ou des objectifs d'étude, plusieurs classifications coexistent. L'une des plus répandues distingue trois grandes catégories : les **ressources énergétiques** (charbon, uranium, hydrocarbures), les **ressources métalliques** (métaux ferreux, non ferreux, précieux), et les **ressources non métalliques**, qui incluent notamment les matériaux de construction, les minéraux industriels et les gemmes (Cuney, 2023). C'est à l'intérieur de cette dernière catégorie que se situent les

matériaux géosourcés. Certains géologues, tels que Michel Jébrak et Éric Marcoux, privilégient une autre classification, illustrée à la figure 3, qui se révèle plus détaillée en fonction des usages des produits.

Ressources minérales	Minerais métalliques	Métaux ferreux (utilisé dans la fabrication d'acier)	Fer
			Chrome
			Manganèse
			Nickel
			Molybdène
		Métaux de base (métaux communs, utilisé dans l'industrie)	Cuivre
			Zinc
			Plomb
			Étain
			Antimoine
			Cobalt
		Métaux de haute-technologie	Gallium
			Lithium
			Niobium
			Platine (et autres métaux de ce groupe)
			Tantale
			Terres-rares
			Titane
		Métaux précieux	Or
			Platine
			Argent
		Autres	Aluminium
	Sources d'énergie	Uranium, pétrole, gaz, charbon	
	Matériaux de construction	Sables, graviers, argiles	
	Minéraux industriels	Silice, kaolin, gypse, talc, potasse, phosphate, sillimanite	
	Pierres précieuses	Diamant, émeraude, opale, rubis, saphir	
	Pierres fines	Agate, améthyste, béryl, grenat, jade, lapis-lazuli, malachite, topaze, tourmaline, turquoise, zircon	

Figure 3. Classification des ressources minérales en fonction de l'utilisation du produit. Crédit :source Jébrak & Marcoux, (2008)

Ce terme (**matériaux géosourcés**), relativement récent, désigne des matériaux de construction issus de formations géologiques ou pédologiques, peu transformés, et d'origine minérale. Il s'agit de matières brutes ou faiblement transformées, comme la terre crue, la pierre sèche, l'argile ou certains sables, utilisées directement dans la construction sans recours à des procédés industriels lourds ou à haute énergie (Fleurent, 2020). Ce sont des matériaux sobres, dont la transformation ne nécessite pas de changement d'état physique, et qui peuvent être extraits localement, réduisant ainsi leur empreinte environnementale (Fleurent, 2020).

Bien que leur usage remonte à plusieurs millénaires, leur désignation sous le vocable de « matériaux géosourcés » s'est surtout développée à partir des années 2010. Une reconnaissance officielle apparaît dans une plaquette du ministère français de la Transition écologique en 2017, qui définit ces matériaux comme issus de ressources minérales comme la terre crue ou la pierre sèche (Ademe, 2019). En 2024, l'Ordre des Architectes de France propose une définition plus précise en insistant sur leur origine minérale et leur faible transformation physique. Ces matériaux, bien que historiquement fondamentaux, ont été longtemps englobés dans une catégorie plus large et floue : celle des **éco-matériaux** (Vincent & Lamoureux, 2024). Le terme **éco-matériau** est apparu dans les années 1990 pour désigner tout matériau de construction respectueux de l'environnement. Il a même fait son entrée dans le dictionnaire en 2019, avec une définition englobante qui inclut aussi bien les matériaux d'origine minérale (**géosourcés**) que ceux d'origine végétale ou animale (**biosourcés**) (Ademe, 2019). Cependant, cette définition demeure imparfaite sur le plan scientifique, car elle ne distingue ni l'origine des matériaux, ni leur mode de transformation, ni leur impact spécifique.

C'est pourquoi il est important de différencier les **matériaux géosourcés** d'autres catégories apparues dans le même contexte de promotion de la **construction durable**. Les **matériaux biosourcés**, par exemple, sont issus de la biomasse végétale ou animale (Jorf, 2012). On y retrouve le bois, la paille, le chanvre, ou le roseau. Leur reconnaissance est aujourd'hui bien établie, notamment à travers des réglementations comme la RE2020, qui leur accorde un statut normatif et incitatif clair.

Les matériaux **éco-sourcés**, quant à eux, se définissent par leur provenance issue de l'économie circulaire. Ils sont fabriqués à partir de déchets valorisés par réemploi ou recyclage, qui cessent alors d'être considérés comme des rebuts pour devenir des matières premières secondaires (Fleurent, 2020). Cette approche s'inscrit dans une logique de sobriété et de réutilisation, mais elle ne dit rien de l'origine géologique ou organique des matériaux en question. Un matériau devient éco-sourcé lorsqu'il est dérivé d'un résidu revalorisé et donc sorti du statut de déchet.

Enfin, il est essentiel d'éclaircir également la notion de **matériau bas carbone**, souvent mobilisée dans les discours sur la construction durable, mais parfois confondue avec les autres catégories précédemment évoquées. Un matériau bas carbone se définit avant tout par son faible impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de son cycle de vie, notamment durant sa fabrication. Contrairement aux matériaux géosourcés, biosourcés ou éco-sourcés, qui sont classés selon l'origine de leur matière première ou leur mode de récupération, le critère « bas carbone » repose sur une évaluation environnementale transversale (Fleurent, 2020). Ainsi, un matériau peut être biosourcé, mais pas nécessairement bas carbone si sa culture, sa transformation ou son transport génèrent beaucoup d'émissions. De même, un

matériau géosourcé, s'il est extrait à grande profondeur, transporté sur de longues distances ou nécessitant une taille mécanique lourde peut engendrer un impact carbone significatif.

L'ensemble de ces distinctions conceptuelles permet de mieux structurer le champ des matériaux de construction durables. En clarifiant les différences entre l'origine géologique, biologique, circulaire ou environnementale d'un matériau, on évite les confusions terminologiques et on pose les bases d'un discours plus rigoureux, à la fois scientifique, technique et opérationnel. Une telle hiérarchisation permettrait aussi de soutenir le développement de filières locales, écologiquement responsables et économiquement viables. Pour les matériaux géosourcés, cela signifie reconnaître leur spécificité : **une ressource minérale, issue de la surface terrestre, peu transformée, locale, durable**, et pourtant encore trop peu valorisée dans les normes actuelles.

2.2. Disponibilité, usage et standardisation des ressources

Les ressources minérales jouent un rôle central dans le développement des sociétés humaines. Leur exploitation remonte à la Préhistoire, époque où la pierre taillée était utilisée pour fabriquer outils et armes. Avec la découverte et la maîtrise des métaux, de nouvelles étapes sont franchies : le cuivre, le bronze puis le fer permettent de produire des armes plus efficaces, des bijoux et des outils plus performants (Jébrak & Marcoux, 2008). Durant cette longue phase, de la Préhistoire au Moyen Âge, l'extraction reste essentiellement locale et artisanale, limitée par les techniques rudimentaires de l'époque.

La Renaissance marque toutefois un tournant majeur. Les progrès scientifiques, l'amélioration des procédés métallurgiques et les débuts du commerce mondialisé entraînent une augmentation des volumes extraits et diversifient les types de minerais exploités (Jébrak & Marcoux, 2008). Cette tendance s'accélère de manière spectaculaire à partir de la Révolution industrielle : la demande explose sous l'effet de l'essor des machines, du chemin de fer, de la construction navale et, plus tard, de l'électricité et des télécommunications. Les mines se mécanisent, la productivité augmente et les flux d'échanges se structurent à l'échelle internationale (Jébrak & Marcoux, 2008).

Depuis le XXe siècle, et plus encore au XXIe, l'extraction minière s'est largement mondialisée, fournissant les ressources nécessaires à des économies toujours plus technologiques et consommatrices. Les minéraux sont devenus essentiels tant aux secteurs de pointe qu'au domaine de la construction, lequel mobilise une vaste gamme de matériaux minéraux indispensables à l'édification et à l'aménagement des bâtiments (Jébrak & Marcoux, 2008). La figure 4 illustre cette réalité, montrant que notre habitat repose, dans une large mesure, sur l'exploitation des ressources du sous-sol.

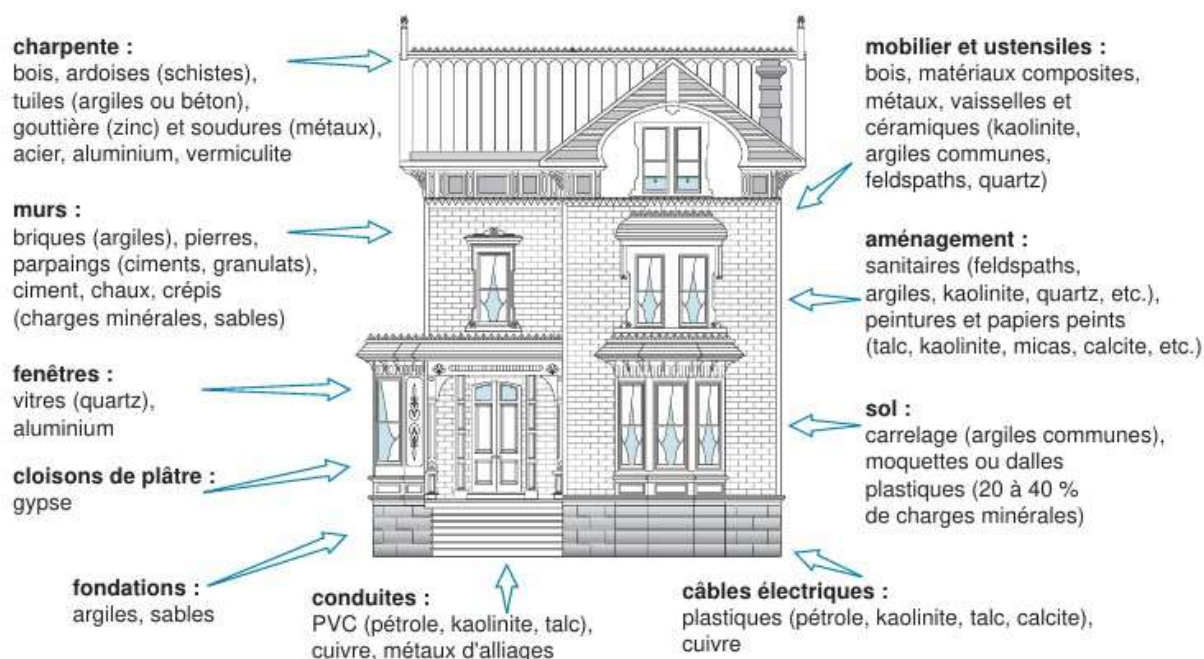


Figure 4. Principales ressources minérales employés pour la construction et l'aménagement d'une maison d'habitation standard. Crédit : Jébrak & Marcoux, (2008).

Cependant, ces ressources sont très inégalement réparties à travers le monde. Cette inégalité ne relève pas du hasard : elle découle de processus géologiques spécifiques qui ne se produisent que dans certains contextes (Jébrak & Marcoux, 2008). Ainsi, certains pays disposent de conditions naturelles particulièrement favorables. Le Canada par exemple est riche en métaux de base (zinc, cuivre, titane, nickel), l'Australie en bauxite et en fer, l'Afrique du Sud en platinoïde, et le Chili en cuivre (Yans, 2017). À l'inverse, de vastes régions comme l'Europe de l'Ouest ou certaines parties de l'Afrique subsaharienne disposent de peu de ressources minérales, comme le démontre la figure 5. Cette concentration géographique crée des dépendances économiques: de nombreux pays importent la majorité de leurs besoins en matières premières. Cela rend les marchés sensibles aux tensions géopolitiques, aux fluctuations des prix, ou aux restrictions imposées par certains États producteurs. Par exemple, la Chine détient une position dominante sur les terres rares, indispensables à la fabrication de technologies de pointe. Le pays possède également de grandes réserves de minerais indispensables à la production d'acier qui représente plus de la moitié de la production mondiale totale, qui est d'environ 1 892 millions de tonnes, ce qui soulève des enjeux stratégiques pour les autres puissances industrielles (Kafu-Quvane & Mlaba, 2024).

Le potentiel minier de la planète reste encore mal connu, en grande partie parce que l'identification des gisements dépend de technologies d'exploration complexes et coûteuses (Calas, 2016). Ce manque de connaissance est d'autant plus important que les ressources minérales sont extrêmement diverses, tant par leur nature que par leur répartition géographique. Si certaines de ces ressources, comme le sable ou le gypse, sont relativement abondantes, d'autres telles que le lithium ou les terres rares sont plus rares et jouent un rôle stratégique essentiel, notamment dans les industries technologiques et énergétiques (Calas, 2016).

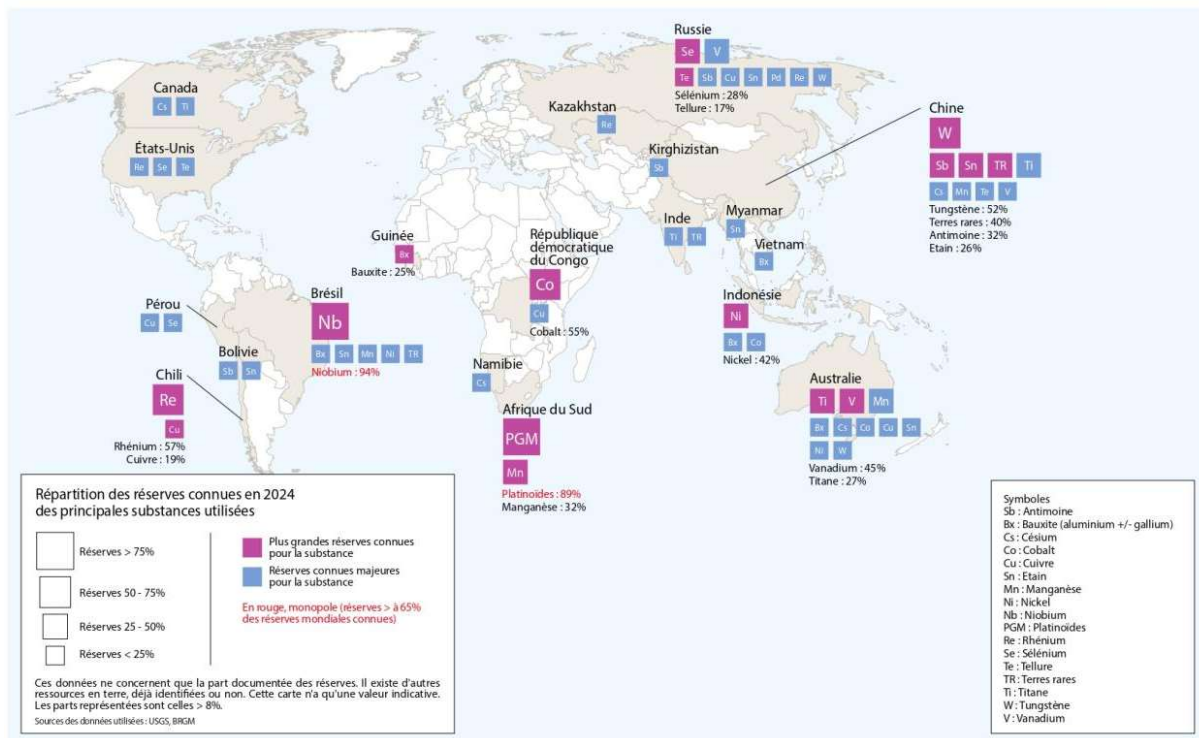


Figure 5. Répartition mondiale des réserves de substance minérales. Crédit : BRGM (2024)

Toutes ces ressources partagent cependant un caractère non renouvelable : les gisements mettent des milliers à des millions d'années à se former, bien au-delà de la vitesse de consommation humaine. Cette non-durabilité est au cœur des enjeux contemporains, surtout dans le contexte d'une transition énergétique supposée « verte », qui repose en réalité sur une intensification de l'extraction de métaux (Vidal, 2018). Le paradoxe est clair : construire une société « low carbon » pourrait nécessiter plus de cobalt, de lithium ou de cuivre que jamais auparavant. Car, pour atteindre les objectifs d'une société à faible émission de carbone, fixé par l'accord de Paris ou même la commission européenne, il est nécessaire de développer et déployer massivement des technologies d'énergies renouvelables telles que les panneaux solaires, les éoliennes et les batteries de stockage d'énergie (Yans, 2017). Ces technologies nécessitent des matières premières minérales spécifiques. La montée en puissance de ces technologies vertes, qui remplaceront progressivement les énergies fossiles, va donc entraîner une demande accrue de ces ressources minérales. Cette dynamique pose des questions majeures en matière d'environnement, de géopolitique, mais aussi de justice sociale, car les zones d'extraction sont souvent situées dans des pays du Sud, alors que les pays consommateurs sont principalement du Nord (Vidal et al., 2013).

Dans le cadre d'une économie mondialisée, les ressources minérales sont de plus en plus soumises à des normes de standardisation industrielle. Ces matériaux doivent répondre à des critères précis de pureté, de performance et de compatibilité technique, imposés par les besoins

des secteurs dominants : construction, électronique, automobile, transition énergétique (Jébrak & Marcoux, 2008). Ce processus oriente les stratégies extractives vers des gisements très spécifiques, capables de fournir des matières premières « parfaites », comme du sable sans impuretés pour le verre, ou du lithium ultraconcentré pour les batteries (Calas, 2016). Ce modèle standardisé, et de construction low-carbon favorise une logique d'optimisation mondiale, où seules certaines ressources, extraites dans des contextes géologiques précis, sont jugées « rentables » et compatibles avec les chaînes de production globalisées. Cela entraîne une dévalorisation des ressources locales considérées comme trop hétérogènes, impures ou insuffisamment abondantes pour répondre aux standards industriels. Par ricochet, cela marginalise des territoires qui pourraient pourtant proposer des alternatives plus durables et adaptées à des dynamiques locales (Yans, 2015).

En ce sens, la standardisation minérale et la poursuite de la création des villes low-carbon, ne relève pas seulement d'une logique technique. Elle structure de nouveaux rapports de force, en renforçant la dépendance de certains pays à des ressources étrangères, tout en exacerbant les inégalités territoriales et en exposant certaines populations aux externalités sociales et environnementales de l'extraction (Calas, 2016). Ce phénomène interroge ainsi la soutenabilité du modèle actuel : à quel prix poursuit-on une industrialisation fondée sur des matériaux « parfaits », si cela contribue à fragiliser d'autres territoires et à ignorer des ressources locales potentiellement mobilisables dans une logique plus contextuelle, plus sobre, et plus juste (Yans, 2015).

2.3. Types et fonctionnement des exploitations

À l'échelle mondiale, l'activité extractive regroupe l'ensemble des opérations liées à l'exploration, l'extraction, le traitement et la valorisation de ressources géologiques issues du sous-sol. Elle inclut non seulement l'extraction de minerais précieux (or, argent, cuivre, etc.) et de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel, uranium), mais aussi des minéraux industriels et des matériaux de construction (calcaire, sable, gravier, marne, ardoise, tourbe, etc.) (Maréchal, 2013). Cette activité, essentielle aux besoins économiques et sociétaux modernes, se caractérise par une grande diversité de techniques et de régimes juridiques. Contrairement à une perception répandue, la distinction entre les différentes formes d'exploitation ne repose pas uniquement sur la profondeur du gisement ou sur la technique utilisée (ciel ouvert ou souterrain), mais principalement sur la nature du matériau extrait et le régime juridique qui s'y applique (Gulinck, 1958). En Belgique, la législation distingue trois formes d'exploitation minérale : les mines, les minières et les carrières. Ces distinctions, établies par des textes législatifs tels que le décret « Carrières » du 4 juillet 2002, sont fondées sur des considérations d'intérêt général, de valeur économique des ressources et de maîtrise publique sur certaines substances stratégiques (A.G.W., 2002).

Les mines

Les mines désignent des sites d'extraction de substances dites « concessibles », c'est-à-dire appartenant à l'État et représentant un intérêt stratégique ou une valeur économique élevée

(SPW, 1989). Ces substances incluent notamment les métaux (fer, cuivre, plomb, or, argent), les combustibles (charbon, uranium) ou encore certains minéraux industriels rares. L'exploitation minière suppose souvent des infrastructures lourdes et complexes comme des puits verticaux, des galeries souterraines, des ventilations ou des dispositifs de drainage. Elle nécessite également une planification rigoureuse en raison des investissements élevés et des risques géotechniques associés (Pacyna & Denayer, 2010). Selon les caractéristiques géologiques du gisement (profondeur, forme, teneur du minerai) et des paramètres économiques (coûts, marché, technologies), différentes méthodes d'exploitation sont utilisées (MMT, 2023):

- **L'exploitation à ciel ouvert** convient aux gisements proches de la surface. C'est une méthode souvent plus rentable, car elle permet un accès direct aux couches riches en minerai sans travaux souterrains importants.
- **L'exploitation souterraine** est privilégiée lorsque le gisement est profond ou lorsque la surface ne permet pas une exploitation ouverte (zones urbanisées, contraintes environnementales). L'exploitation se fait à travers un réseau de galeries profondes et de puits verticaux.
- **L'exploitation alluviale**, aussi appelée exploitation des placers, se pratique dans des environnements sédimentaires (lits de rivières, deltas, zones sablonneuses) où des minéraux lourds ont été concentrés naturellement par l'érosion. Cette méthode permet de récupérer des matériaux comme le platine, l'étain ou le diamant.
- **L'exploitation in situ** consiste à injecter dans le sous-sol une solution chimique permettant de dissoudre le minéral à extraire. Le liquide est ensuite pompé à la surface pour traitement. Cette technique, moins invasive mais technologiquement exigeante, est notamment utilisée pour l'uranium dans des formations perméables (Cummins, 2025).

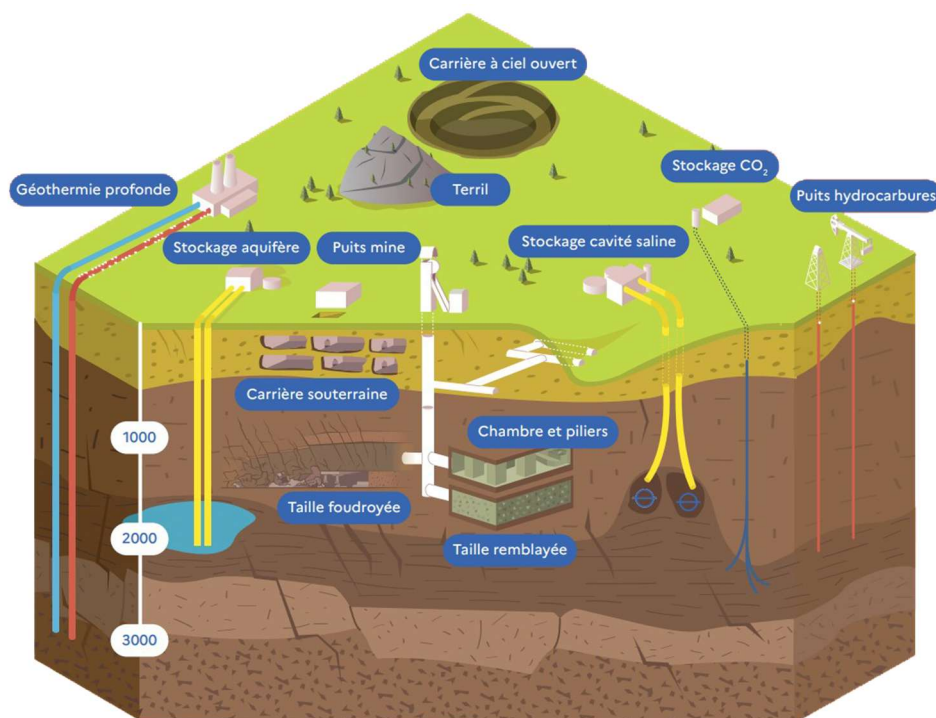


Figure 6. Variétés des techniques d'exploitation du sous sol. Crédit : Ineris (2023)

Les minières

Le terme « minière » fait référence à des exploitations historiques de faible ampleur, souvent artisanales, pratiquées dans des gisements superficiels. Ces exploitations concernaient notamment les minerais de fer d'alluvion, les terres pyriteuses (utilisées pour produire du sulfate de fer), les terres alumineuses, ou encore les tourbes destinées au chauffage domestique ou à l'usage agricole (DGO 3, 2020). Les minières étaient généralement creusées à la main, avec peu d'infrastructures techniques, et leur exploitation relevait d'un régime spécifique autrefois défini dans la législation belge. Cette catégorie a toutefois été supprimée avec l'entrée en vigueur du décret des mines du 7 juillet 1988, bien que le terme subsiste à titre historique ou régional dans certains territoires (DGO 3, 2020).

Les carrières

Les carrières constituent la catégorie la plus étendue dans l'activité extractive contemporaine. Elles concernent principalement l'exploitation des matériaux dits « non métalliques » ou « non concessibles », qui ne relèvent pas de l'État. Ce sont généralement des matériaux de construction ou des ressources utilisées dans les industries manufacturières (granulats, calcaire, sable, marnes, pierres à bâtir, marbre, kaolin, argile, tourbe, etc.) (Gulinck, 1958). Les gisements sont souvent situés à faible profondeur, ce qui justifie une exploitation à ciel ouvert, même si certaines exploitations se font en souterrain lorsque la configuration géologique ou l'intérêt patrimonial l'impose. On distingue plusieurs types de carrières selon les matériaux exploités et les méthodes employées (Normandie, 2021):

- **Les carrières de roches massives** (calcaires, granits, schistes, grès), où l'extraction nécessite des tirs de mines pour fragmenter la roche. Ces matériaux sont souvent utilisés dans la construction de routes, de bâtiments, ou dans les cimenteries (Pacyna & Denayer, 2010).
- **Les carrières de pierre de taille**, qui extraient des blocs à haute valeur ajoutée destinés à la construction ou à la restauration de monuments. L'extraction y est plus précise, souvent réalisée à l'aide de haveuses ou d'engins de découpe (Pacyna & Denayer, 2010).
- **Les carrières de roches alluvionnaires**, situées en lit mineur ou majeur de cours d'eau, produisent des sables, graviers ou galets. L'extraction se fait par pelles mécaniques ou dragues suceuses, puis les matériaux sont triés, lavés, parfois broyés avant d'être commercialisés (Pacyna & Denayer, 2010).
- **Les carrières souterraines**, qui extraient des matériaux comme la craie, la marne ou le tuffeau, souvent exploité en galerie afin de préserver la qualité du matériau ou d'éviter l'impact paysager. Ces exploitations restent juridiquement des carrières, même si leur fonctionnement technique se rapproche de certaines mines (Pacyna & Denayer, 2010).

Certains types de carrières sont désignés par la nature du matériau extrait :

- **Les argilières**, spécialisées dans l'extraction d'argile, utilisée notamment pour la fabrication de briques, tuiles, céramiques et produits réfractaires (Normandie, 2021).

- **Les sablières et gravières**, exploitant respectivement le sable et le gravier, essentiels dans la production de béton, les travaux publics, la fabrication de verre ou de revêtements (Normandie, 2021).
- **Les tourbières**, lieux d'extraction de la tourbe, matière organique fossile utilisée comme combustible ou comme amendement agricole. L'exploitation s'y fait de manière superficielle, par décapage des couches supérieures (Normandie, 2021).

En Belgique, l'exploitation des ressources minérales se concentre aujourd'hui essentiellement sur les carrières, sablières, gravières et argilières, qui fournissent principalement des matériaux destinés à la construction. À l'inverse, l'extraction du charbon et des minerais métalliques, qui a longtemps soutenu le développement industriel du pays, a progressivement décliné au cours du XXe siècle, jusqu'à la fermeture de la dernière mine de charbon à Zolder en 1992 (Gouvernement belge, 2012). En Belgique, la gestion des ressources naturelles repose sur une approche intégrée, qui vise à concilier les impératifs économiques de l'exploitation avec les exigences de protection de l'environnement, d'aménagement du territoire et de participation citoyenne. Cette démarche se traduit notamment par une planification territoriale rigoureuse, inscrivant les projets extractifs dans les plans d'affectation du sol, ainsi que par des procédures de concertation publique encadrant l'octroi des autorisations. Cette gouvernance territoriale cherche à garantir une exploitation des ressources minérales qui soit à la fois durable, socialement acceptée et adaptée aux enjeux locaux (Gouvernement belge, 2012). L'exploitation d'un gisement suit un cycle structuré, jalonné par plusieurs étapes clés. Ce cycle est globalement commun aux mines et carrières, bien que les modalités varient en fonction des matériaux extraits, des techniques mobilisées et du contexte réglementaire.

La première phase est celle de la prospection, qui vise à identifier la présence de ressources exploitables. Elle repose sur des études géologiques, des campagnes de sondage et des analyses de terrain permettant de localiser les gisements potentiels. Cette étape revêt une dimension stratégique importante, car elle conditionne l'engagement d'investissements souvent lourds et risqués. En Wallonie, par exemple, les opérateurs souhaitant explorer une ressource doivent obtenir un permis d'exploration, délivré à l'issue d'une procédure publique conforme au droit européen (SPW, 2025).

Une fois le gisement identifié, des études de faisabilité sont menées. Elles évaluent la rentabilité du projet au regard de paramètres techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Cette analyse s'accompagne de démarches administratives pour obtenir les autorisations nécessaires : **permis d'environnement** (Obligatoire pour toute activité susceptible d'avoir un impact sur l'environnement). **Permis d'urbanisme** (Régule les modifications du relief et l'aménagement du site d'extraction), inscription dans les **plans d'affectation du sol** (Les sites d'extraction doivent être inscrits dans les plans régionaux de zonage, qui déterminent les usages autorisés du territoire) et, dans certains cas, **permis d'exploitation** spécifique (Pour certains types de ressources comme le gaz de mine, un permis spécifique d'exploitation est requis, souvent précédé d'un permis d'exploration) (Bréard, 2022). En Belgique, l'obtention de ces autorisations implique la réalisation d'une étude d'incidences environnementales (EIE) pour les projets de grande envergure sur plus de 10 hectares, ainsi qu'une consultation du public (Gouvernement belge, 2012).

Vient ensuite la phase d'exploitation proprement dite. Dans le cas des carrières en Belgique, l'extraction se fait majoritairement à ciel ouvert, bien que certaines exploitations souterraines subsistent, notamment pour l'extraction de la craie, du tuffeau ou du marbre (Fediex, 2020). Le processus commence par le décapage des terres de couverture, suivi de l'abattage de la roche (souvent à l'aide d'explosifs pour les matériaux durs comme le calcaire ou le granite). Les matériaux sont ensuite transportés vers les installations de traitement, où ils subissent différentes opérations : concassage, criblage, lavage ou tri, selon l'usage prévu (Fediex, 2020).

Les activités d'extraction ne peuvent être menées sans contrôle strict. Les autorités imposent aux exploitants de rendre compte périodiquement de la quantité de matériaux prélevés, des actions engagées pour limiter l'impact environnemental et du respect des prescriptions définies dans leurs permis. Afin d'assurer la sécurité des travailleurs et la conformité des pratiques sur site, des inspections régulières sont également effectuées. (Fediex, 2020).

Enfin, la fermeture du site marque le début de la dernière phase du cycle : La réhabilitation constitue une étape cruciale et réglementée dans le cycle de vie des sites d'exploitation en Belgique. Elle vise à garantir la sécurité, la stabilité et la réintégration environnementale des sites après leur fermeture. Cette obligation légale est encadrée principalement par le décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement (SPW, 2002). Dès la demande de permis, les exploitants doivent présenter un plan de remise en état du site, accompagné d'une garantie financière destinée à couvrir l'ensemble des coûts liés aux travaux de réhabilitation. Ce mécanisme permet d'éviter l'abandon de sites dégradés en cas de défaillance de l'exploitant. Les objectifs de la réhabilitation sont multiples. D'abord, il s'agit de sécuriser le site : cela passe par la stabilisation des talus, la prévention des glissements de terrain ou encore l'élimination des risques liés aux infrastructures abandonnées. Ensuite, un soin particulier est apporté à la réintégration paysagère, souvent par le modelage du relief et le reboisement avec des essences végétales locales afin de fondre le site dans son environnement naturel (Bréard, 2022). Au-delà de la simple remise en état, la réhabilitation peut aussi devenir une opportunité de valorisation écologique et sociale. Certaines carrières sont transformées en zones humides, en habitats pour la faune locale, ou encore en espaces de loisirs tels que des sentiers de randonnée, des plans d'eau ou des réserves naturelles. Dans d'autres cas, les sites réhabilités peuvent accueillir des projets d'intérêt économique ou environnemental, comme des fermes solaires ou des zones agricoles expérimentales (Fediex, 2020).

Une fois les travaux de réhabilitation achevés, un suivi post-fermeture est mis en place pour évaluer l'efficacité des mesures et assurer la stabilité du site à long terme. Ce suivi peut durer plusieurs années et permet de s'assurer que le site ne présente pas de risques pour l'environnement ou la sécurité publique. L'exploitant demeure responsable de l'état du site pendant cette période. Si nécessaire, la garantie financière fournie à l'avance peut être utilisée par les autorités pour intervenir (SPW, 1989).

2.4. Avantages économiques, sociaux et territoriaux

L'exploitation des ressources du sous-sol représente une activité stratégique générant des retombées significatives aussi bien pendant qu'après la phase d'extraction. Durant l'exploitation, les avantages sont essentiellement directs : l'industrie extractive en Belgique (granulats alluvionnaires ou marins, calcaire, chaux, dolomie, roche dure, roche ornementale, sable, etc.) alimente à elle seule plus de 85 % des autres secteurs industriels, ce qui en fait un pilier incontournable de l'économie (Le Forem, 2024). Elle joue un rôle fondamental dans la réussite de ces secteurs, tant par le nombre de personnes qu'elle emploie que par le chiffre d'affaires qu'elle génère. L'impact économique se prolonge également à travers de lourds investissements dans les engins de forage, de transport ou de fabrication, qui alimentent d'autres filières industrielles (Le Forem, 2024). En parallèle, l'activité extractive entraîne la construction d'infrastructures telles que des routes, des réseaux d'eau ou d'électricité, qui, bien que conçues pour répondre à des besoins opérationnels, profitent souvent durablement aux communautés locales. Ces équipements, tout comme les effets de reconversion post-extraction (restauration écologique, réutilisation des sites, reconquête de la biodiversité), constituent des avantages indirects ou différés, qui renforcent encore l'utilité territoriale et environnementale du secteur extractif (Ineris, 2023).

Parmi les avantages liés à cette activité nous avons :

- **Création d'emplois:**

Le secteur extractif constitue un important pourvoyeur d'emplois, tant dans ses activités principales que dans les services qui y sont liés. Il génère des postes de travail directs dans les opérations d'extraction, mais aussi des emplois indirects dans des domaines tels que le transport, la sous-traitance, la maintenance ou la logistique. Entièrement dominé par le secteur privé, ce domaine se caractérise par une forte présence ouvrière : plus de 69 % des postes sont occupés par des ouvriers, contre environ 30 % par des employés (Etopia, 2010). Cette répartition traduit la nature essentiellement opérationnelle et technique des activités extractives. Le secteur présente également une grande hétérogénéité en termes de structure d'entreprises et de spécialités. On y retrouve des exploitations de tailles diverses, intervenant dans l'extraction de matériaux variés comme le calcaire, la dolomie, le sable ou les roches ornementales. D'après les données publiées par le Forem (2024), l'industrie extractive belge compte 29.670 postes de travail en fin 2022, avec une croissance annuelle d'environ 1,42 %. Le recours au travail intérimaire et à la sous-traitance est également fréquent dans ce secteur, ce qui renforce la flexibilité du marché du travail qui lui est associé (Le Forem, 2024). L'emploi indirect lié à l'industrie extractive est estimé à environ 16.000 postes, principalement concentrés dans les secteurs du transport, de la manutention, de la réparation des engins ou des services logistiques (Etopia, 2010).

- **Stimulation de l'économie:**

Les activités extractives représentent un levier économique essentiel pour les territoires où elles sont implantées. Les revenus générés par l'exploitation des ressources naturelles alimentent non seulement le chiffre d'affaires des entreprises du secteur, mais contribuent aussi, par les

redevances et les impôts, aux recettes publiques. Les autorités publiques mettent en place des mécanismes fiscaux pour s'assurer que les bénéfices issus de cette exploitation profitent également aux populations locales (Etopia, 2010). Ces prélèvements permettent d'investir dans le développement d'infrastructures, la santé, les services sociaux, ainsi que dans des programmes économiques ou sociaux dont dépendent de nombreuses communautés.

En Wallonie, l'industrie extractive se classe au dixième rang des secteurs industriels en termes de chiffre d'affaires, avec une production annuelle d'environ 70 millions de tonnes pour une valeur estimée à 600 millions d'euros (Fediex, 2020). Elle figure également parmi les dix premiers secteurs en matière de création de valeur ajoutée brute, ce qui témoigne de son poids structurel dans l'économie régionale. En 2007, cette contribution s'élevait à 223 millions d'euros, soit un peu moins de 2 % de la valeur ajoutée industrielle régionale. Cette dynamique économique est renforcée par le lien étroit que le secteur extractif entretient avec d'autres domaines, en particulier l'industrie manufacturière et le secteur de la construction, qui dépendent directement de l'approvisionnement en matières premières locales (Le Forem, 2024).

- **Fourniture de ressources essentielles:**

L'industrie extractive constitue un maillon fondamental dans les chaînes d'approvisionnement de nombreux secteurs industriels et techniques. Elle fournit des matières premières indispensables à des activités stratégiques telles que la verrerie, la métallurgie, la chimie, ainsi qu'à des filières moins visibles mais tout aussi dépendantes, comme la sucrerie, l'alimentation animale, la céramique ou encore la fabrication de papier (Etopia, 2010). Ces ressources extraites localement sont souvent difficiles à substituer, en raison de leurs propriétés physiques spécifiques ou de leur disponibilité géographique. En Wallonie, près de 80 % de la production de matériaux issus de l'extraction sont consommés sur le territoire belge, ce qui souligne l'importance de cette industrie dans le maintien de l'autonomie matérielle du pays (Etopia, 2010). Les matériaux produits, souvent pondéreux et de faible valeur unitaire, comme les granulats ou certaines roches, sont généralement destinés à un marché de proximité. Leur transport sur de longues distances est peu rentable, ce qui limite leur commercialisation à l'échelle internationale. Seules certaines pierres naturelles, en raison de leur valeur ajoutée élevée, font l'objet d'exportations ciblées, principalement vers les pays voisins comme la France, les Pays-Bas, l'Allemagne et le Luxembourg (Etopia, 2010).

- **Développement de l'infrastructure:**

L'activité extractive exige la mise en place d'infrastructures techniques adaptées aux exigences des opérations d'extraction, de traitement et d'acheminement des matériaux. Cette nécessité entraîne souvent la création ou l'amélioration d'infrastructures locales telles que des routes d'accès, plateformes logistiques, voies ferrées industrielles ou réseaux de drainage, indispensables pour assurer le fonctionnement optimal des sites. Ces aménagements, bien qu'initiés pour des raisons strictement opérationnelles, facilitent dans certains cas la circulation des biens et des personnes dans des zones parfois peu desservies (Le Forem, 2024). Ce rôle structurant est particulièrement visible dans les territoires où l'activité extractive s'inscrit dans une logique de long terme.

- **Réinvention des paysages :**

L'arrêt d'une activité extractive ne signe pas la fin de la fonction du site ; au contraire, il marque souvent le début d'une seconde vie, fondée sur la requalification écologique, paysagère et sociale de l'espace exploité. Les anciennes carrières, loin de devenir de simples friches, s'imposent de plus en plus comme des leviers de valorisation territoriale, capables d'accueillir des formes variées d'usages compatibles avec les enjeux contemporains de durabilité. Loin de nuire systématiquement à l'environnement, l'exploitation extractive peut, lorsqu'elle est bien encadrée, contribuer à la création de nouveaux habitats naturels (Fediex, 2020). En effet, les perturbations régulières générées par les travaux (décapage, creusement, mise à nu de substrats) offrent en permanence des milieux vierges, propices à l'installation d'espèces dites pionnières, qui trouvent peu de terrains favorables dans les paysages agricoles ou urbanisés. Ces milieux particuliers (falaises, mares temporaires, éboulis, substrats calcaires) accueillent une biodiversité souvent rare en Belgique. Pour pérenniser cette richesse écologique, le projet LIFE in Quarries, coordonné par Fediex et soutenu par l'Union européenne, a introduit le concept innovant de gestion dynamique de la biodiversité. Il ne s'agit plus simplement de restaurer la nature après coup, mais d'introduire des pratiques écologiques pendant l'exploitation même, assurant ainsi une continuité des habitats pour les espèces ciblées (amphibiens, odonates, oiseaux nicheurs au sol...). (Fediex, 2020).

Outre leur richesse écologique, les anciennes carrières offrent un potentiel paysager unique : reliefs marqués, plans d'eau artificiels, vues dégagées et structures géologiques visibles deviennent les supports d'aménagements originaux (Sersiron & Delobel, 2015). De nombreux sites d'extraction ont été convertis en espaces de détente, de loisirs doux ou de découverte de la nature. Des projets de reconversion ont vu naître des parcs publics, des réserves naturelles ou des zones d'observation de la faune, répondant à une demande croissante de nature de proximité, en particulier en zones périurbaines (Ritimo, 2023). Cette transformation s'accompagne également d'une valorisation sociale des sites : les carrières requalifiées participent à la régénération de territoires parfois dévalorisés, en offrant des espaces de qualité, des opportunités touristiques, voire des lieux d'éducation à l'environnement.

Contrairement aux craintes souvent associées aux sites industriels, les carrières réhabilitées peuvent coexister avec les zones résidentielles voisines, voire renforcer leur attractivité. Grâce à des aménagements intégrés (berges paysagées, sentiers, écrans végétaux), ces espaces deviennent des interfaces fonctionnelles entre nature et urbanité. Dans certains cas, des projets d'urbanisme intègrent même l'ancien site extractif comme élément structurant d'un nouveau quartier, ou comme zone tampon écologique entre pôles d'activité (Ritimo, 2023).

2.5. Désavantages sociaux, économiques et environnementales

D'après Thomas (2013), l'exploitation des ressources est une activité ancestrale, profondément ancrée dans le développement des sociétés humaines, au même titre que l'agriculture. Cette activité a constitué l'un des piliers des processus d'industrialisation et de colonisation, façonnant les rapports économiques et politiques mondiaux jusqu'à aujourd'hui. À l'aube du XXI^e siècle, la pression sur les ressources minérales s'intensifie, portée notamment par l'essor des économies émergentes et la demande massive de matières premières. La Chine par exemple, à elle seule, consomme près de 40 % des métaux de base et 44,9 % du charbon mondial, illustrant cette dynamique globale (Thomas, 2013). Dans ce contexte, l'architecture et le secteur de la construction occupent une place centrale. Bâtir implique inévitablement de puiser dans le sous-sol : pierre, sable, ciment, acier, cuivre, aluminium, etc tous ces matériaux proviennent d'un cycle extractif mondialisé, dont les impacts excèdent largement le cadre purement technique. Derrière les façades, c'est tout un système géopolitique, économique et écologique qui se déploie, souvent invisible aux yeux des concepteurs.

En Europe, l'exploitation du sous sol a connu un net recul depuis plusieurs décennies. Le cas de la Wallonie, étudié par Édouard Poty et Emmanuel Chevalier entre 1995 et 2002, illustre cette évolution : le nombre de sites d'extraction y a considérablement chuté, tendance observée dans la majorité des pays du Nord. Ce retrait ne s'explique pas seulement par l'épuisement des gisements, mais surtout par l'émergence de contraintes économiques, environnementales et sociales (Poskin, 2010). Selon Thomas (2013), l'image des mines en Europe demeure étroitement liée à un héritage historique : elles renvoient à l'industrialisation, aux conditions de vie éprouvantes des mineurs aux « gueules noires », ainsi qu'aux luttes sociales qui les ont accompagnées. L'auteur souligne que, loin d'avoir disparu, cette réalité s'est transformée et s'est déplacée vers des régions du monde où les exigences en matière de normes et de coûts sont moins strictes, comme en témoignent de nombreuses actualités en provenance des pays du Sud. Il précise également que cette tendance se manifeste aussi plus près de nous, par exemple à travers la fermeture de hauts-fourneaux en France et en Belgique, décidée par le groupe anglo-indien ArcelorMittal.

Le recentrage de l'activité extractive dans les pays du Sud s'accompagne d'une dépendance croissante des pays du Nord à l'égard de ces matières premières. L'Union européenne, par exemple, dépend presque entièrement des importations pour certains minéraux stratégiques tels que le cobalt, le platine et le titane (Commission européenne, 2012). Cette demande est principalement satisfaite par des pays producteurs du Sud, où la production minière dépasse largement la consommation locale, atteignant parfois jusqu'à seize fois la demande intérieure (USGS, 2008). Ce déséquilibre illustre ce que Thomas (2013) désigne comme la « malédiction des ressources » : le paradoxe de pays riches en matières premières, mais dont la population ne bénéficie pas d'une réelle amélioration de ses conditions de vie.

Cette « malédiction » a des conséquences profondes sur les structures sociales et écologiques, nourrissant tensions et conflits. Selon le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), depuis 1990, au moins dix-huit conflits violents ont été liés à l'exploitation des ressources naturelles, et plus de 40 % des conflits internes des soixante dernières années

trouvent en partie leur origine dans cette compétition pour ces ressources (PNUE, 2009). On pense tout de suite aux « diamants du sang » en Sierra Leone et au Liberia, la guerre persistante dans l'Est de la RDC (Thomas, 2013), ainsi que des situations similaires en Colombie et en Birmanie (Triest, 2012). La pauvreté persistante dans ces pays riches en ressources découle également de l'héritage colonial, qui a structuré un système extractif au service des puissances étrangères. Ce modèle a cantonné de nombreux pays du Sud au rôle de fournisseurs de matières premières et les a maintenus dans une dépendance aux produits finis importés (Thomas, 2013).

Après la décolonisation, les structures d'échanges inéquitables se sont maintenues. En Amérique latine par exemple, la Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPAL) met en garde contre une « reprimarisation » des économies, marquée par un retour à la dépendance aux exportations de matières premières. Sous l'effet des échanges croissants avec la Chine et l'Europe, leur part dans les exportations est passée de 27 % au début des années 1980 à 40 % en 2009, concentrée sur un petit nombre de produits (Thomas, 2013).

Au-delà de ses conséquences économiques et sociales, l'exploitation des ressources minérales engendre également des impacts environnementaux majeurs, révélant une dynamique industrielle aux effets bien plus étendus que la seule production ou croissance économique. Ce processus, souvent intensif et étendu sur de vastes territoires, induit des transformations profondes des milieux dans lesquels il s'implante. En mobilisant d'importants volumes de matière, il perturbe les équilibres écologiques et interfère avec les dynamiques sociales locales. Bien que largement documentés, ces impacts demeurent souvent sous-estimés, voire ignorés du grand public, notamment en raison de l'éloignement géographique des sites extractifs, généralement situés à plusieurs centaines de kilomètres des centres urbains. Cette distance contribue à invisibiliser les nuisances environnementales et sociales de l'activité.

Parmi les principales nuisances souvent évoquer nous retrouvons :

- Pollution de l'air : Parmi les nuisances majeures liées à l'exploitation des carrières, la pollution de l'air occupe une place prépondérante. Elle est principalement due aux émissions de poussières, issues de sources diffuses telles que les opérations de découverture, d'extraction, de concassage, de criblage, l'érosion éolienne sur les stocks de matériaux, ainsi que la circulation intense des engins et camions sur les pistes du site. La quantité, la taille et la composition chimique de ces particules varient en fonction des conditions microclimatiques locales et de la nature des matériaux extraits. Par exemple, les carrières de calcaire génèrent des poussières alcalines, tandis que les mines de charbon produisent des particules plus acides, ce qui influence leur impact sur l'environnement (Ridley, 2024). Ces poussières en suspension dégradent la qualité de l'air et peuvent représenter un risque pour la santé. Elles ont également des effets directs sur la végétation environnante, provoquant une abrasion des surfaces foliaires, une obstruction des structures internes et des déséquilibres physiologiques affectant leur développement (Ridley, 2024). À cette pollution particulière s'ajoutent les émissions de gaz issues de la combustion de carburants par les engins et équipements présents sur site. Bien que moins visibles, ces rejets contribuent aux émissions de gaz à effet de serre et renforcent l'empreinte carbone de l'activité extractive (Ridley, 2024).

- Pollution des eaux souterraines : L'exploitation des carrières exerce une pression significative sur les ressources en eau, tant souterraines que superficielles. L'une des principales interventions hydrauliques liées à cette activité est l'exhaure, opération nécessaire pour maintenir à sec la fosse d'extraction. Cette opération provoque un rabattement de la nappe phréatique, entraînant un abaissement du niveau de l'eau souterraine autour du site, dont les effets peuvent se faire sentir à grande distance. Ce phénomène peut se traduire par une baisse du niveau des puits, le tarissement de sources, la discontinuité de certains cours d'eau devenus perchés, voire des instabilités géologiques comme des effondrements karstiques dans les terrains calcaires ou des tassements de sol (Duquenne & Ore, 2010). Parallèlement, les carrières sont également consommatrices d'eau, notamment pour le traitement des matériaux, le nettoyage ou le contrôle des poussières. Cette consommation peut représenter une part non négligeable de la demande industrielle, comme en Wallonie où l'extraction minérale constitue environ 6 % de la consommation d'eau industrielle hors production d'électricité (Duquenne & Ore, 2010). En outre, les prélèvements en eau de surface, les rejets d'eaux usées ou d'eau d'exhaure, ainsi que les modifications du réseau hydrographique naturel à travers les ruissèlements et les infiltrations, accentuent la pression sur les milieux aquatiques, comme l'illustre la figure 7.

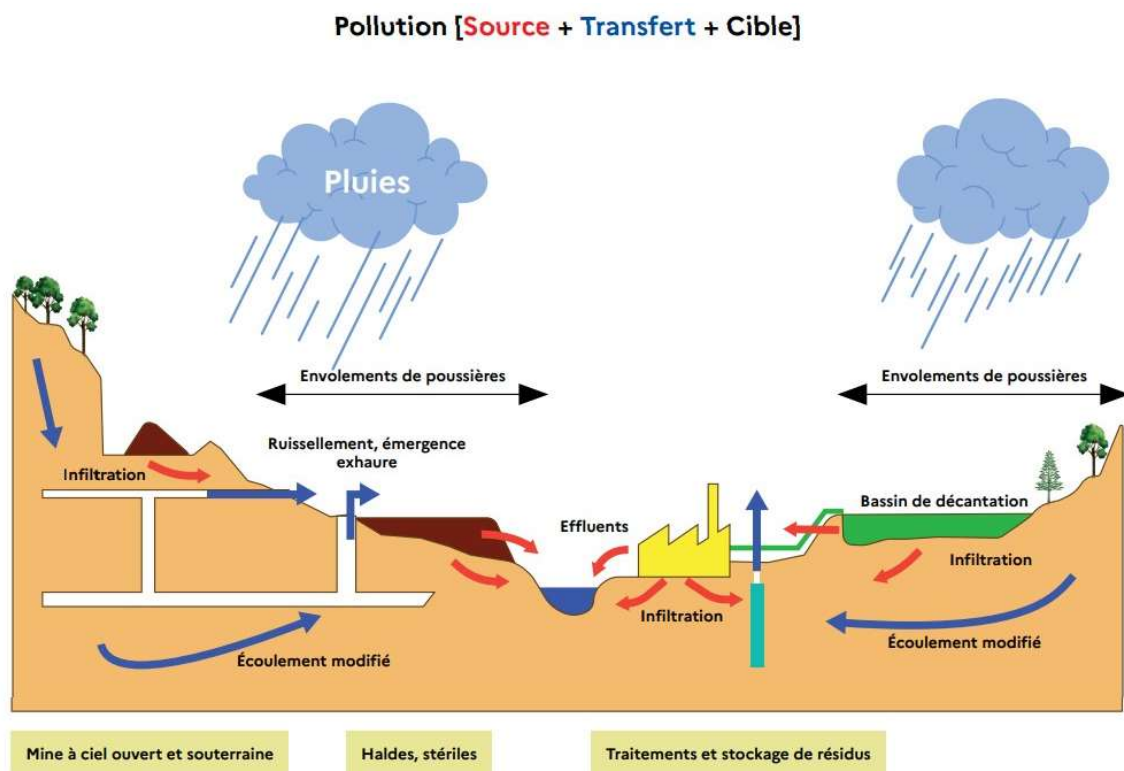


Figure 7. Sources de pollution et voies de transfert de polluants en contexte minier. Crédit : Ineris 2023

- Pollutions sonores et vibratoires : Le bruit constitue une nuisance omniprésente dans le fonctionnement des carrières, résultant à la fois des opérations d'extraction et des activités périphériques. Dès les phases préparatoires, telles que la construction d'infrastructures d'accès et l'aménagement du site, jusqu'à l'exploitation proprement dite, une diversité d'actions génèrent des niveaux sonores élevés : enlèvement de la terre végétale, travaux de découverture, fragmentation de blocs rocheux, tirs de mines, extraction mécanique, concassage, criblage,

sciage de roches ornementales, manutention et stockage des matériaux (Ridley, 2024). Les tirs de mines a eux seuls engendrent trois types d'effets distincts : la projection de fragments rocheux et de poussières, la génération d'ondes sonores dans l'air, et surtout, la propagation de vibrations dans le sol sous forme d'ondes solidiennes. Ces vibrations, dont l'intensité et la fréquence dépendent de la charge explosive et des conditions géologiques locales, peuvent provoquer des nuisances significatives (Duquenne & Ore, 2010). Elles sont susceptibles d'altérer la stabilité des constructions avoisinantes, elles peuvent également perturber les cycles biologiques de certaines espèces, notamment leur reproduction ou leurs comportements migratoires. Indépendamment des dommages matériels potentiels, ces ondes vibratoires sont également perçues par les habitants comme une source de gêne, même lorsqu'elles demeurent en deçà des seuils réglementaires de sécurité structurelle, en raison de leur caractère soudain, répétitif et ressenti corporellement. À cela s'ajoutent les nuisances sonores liées à la circulation des engins lourds (camions, dumpers, chargeurs), tant à l'intérieur du site qu'aux abords, notamment lors du transport des matériaux vers les clients ou fournisseurs. En plus de ces bruits discontinus ou impulsionnels, l'activité produit également un fond sonore permanent, généré par le fonctionnement de divers équipements comme les moteurs de pompes, compresseurs ou groupes électrogènes. L'ensemble de ces sources crée un environnement acoustique fortement perturbé, susceptible d'impacter la qualité de vie des riverains, de perturber la faune locale, et de susciter des tensions sociales, notamment lorsque les sites sont implantés à proximité de zones habitées (Ridley, 2024).

- Consommation énergétique : L'exploitation des carrières repose sur une consommation énergétique soutenue, principalement assurée par deux sources : le diesel et l'électricité, qui représentent ensemble une part significative du coût d'exploitation, pouvant atteindre environ 10 % du prix de revient (Duquenne & Ore, 2010). Ces énergies sont utilisées pour faire fonctionner les engins de chantier, les installations de concassage, les systèmes de pompage ou encore les unités de traitement. À cela s'ajoutent, selon les configurations et les besoins spécifiques des sites, d'autres formes d'énergie comme l'essence, le gaz naturel (notamment pour les unités de séchage), le gaz en bonbonnes (butane ou propane), ainsi que les explosifs utilisés pour le dynamitage (Duquenne & Ore, 2010). Cette diversité de sources traduit une forte dépendance de l'activité extractive aux énergies fossiles, avec des implications directes en matière de coûts, de durabilité et d'impact environnemental, notamment à travers les émissions de gaz à effet de serre générées par la combustion de carburants

- Dommages causés à la biodiversité et aux milieux naturels : L'exploitation d'une carrière engendre inévitablement des perturbations écologiques significatives, affectant la faune, la flore et les milieux naturels, en particulier lorsque les zones concernées n'étaient pas occupées ou modifiées par l'homme. La destruction ou la fragmentation des habitats naturels conduit à une altération directe ou indirecte de la biodiversité, entendue ici comme l'ensemble des espèces vivantes (poissons, insectes, invertébrés, reptiles, oiseaux, mammifères, plantes, champignons, micro-organismes) qui interagissent au sein d'un équilibre écologique complexe (Duquenne & Ore, 2010). Ces atteintes, souvent invisibles à court terme, fragilisent les relations d'interdépendance entre espèces et peuvent compromettre la résilience des écosystèmes. Même les habitats non directement excavés peuvent subir des impacts, notamment à travers les

modifications des régimes hydriques, qui provoquent l'assèchement ou l'inondation de zones naturelles sensibles.

Toutefois, bien que ces effets puissent être profonds, ils ne sont pas nécessairement irréversibles. Grâce à une planification rigoureuse et à une gestion écologique post-extraction, il est possible de restaurer, voire de valoriser écologiquement les sites dégradés (Ridley, 2024). Certaines anciennes carrières, par exemple ouvertes dans des zones agricoles, peuvent être reconverties en zones humides ou milieux pionniers, créant ainsi de nouveaux habitats susceptibles d'accueillir une biodiversité diversifiée, parfois même plus riche que celle du site initial (Ridley, 2024). Ce double potentiel destructeur et restaurateur confère à l'activité extractive une responsabilité particulière dans la gestion des équilibres écologiques à long terme.

2.6. Vers une approche intégrée et territoriale

L'analyse des pratiques extractives actuelles révèle un modèle à bout de souffle, incapable de répondre aux enjeux écologiques, sociaux et territoriaux de notre époque. Face à cette impasse, une transition profonde s'impose, notamment dans le secteur de la construction, grand consommateur de ressources minérales. Cette transition invite à repenser non seulement les matières utilisées, mais aussi notre rapport au sol, à la matière, et aux cycles de vie des matériaux. Elle ouvre la voie à des alternatives telles que la construction circulaire, le réemploi, ou encore le retour à des matériaux biosourcés ou géosourcés comme la terre crue, qui réinterrogent notre manière d'habiter le monde (El Warcha et al., 2023).

L'exploitation traditionnelle des ressources minérales pour la construction repose généralement sur un modèle linéaire, qui consiste à extraire la matière, la transformer, la transporter, puis l'utiliser, sans considération suffisante pour les spécificités et les capacités de renouvellement des territoires d'extraction. Or, les sols et les paysages ont une capacité naturelle à se régénérer, c'est-à-dire à retrouver leurs fonctions essentielles, telles que la production alimentaire ou la filtration de l'eau, à condition que leur exploitation soit réalisée de manière réfléchie et respectueuse. Il devient dès lors nécessaire de repenser cette approche en intégrant l'extraction dans les choix locaux, en limitant notamment les distances de transport, en préservant la qualité des sols, et en coordonnant les différents acteurs concernés, qu'il s'agisse des collectivités, des entreprises ou des habitants. Cette gestion collective et territorialisée des ressources, désignée par certains chercheurs comme une « écologie industrielle appliquée au territoire », permet d'améliorer l'efficacité des flux de matériaux et de limiter la production de déchet (ADEME, 2022).

Ce cadre conceptuel invite à considérer les matériaux non plus comme des flux isolés, mais comme des éléments interconnectés au sein d'un système local où les sous-produits d'une activité peuvent devenir les intrants d'une autre, réduisant ainsi les pertes et les déplacements inutiles. En France, plusieurs démarches expérimentales montrent que cette organisation territoriale permet de concilier exploitation des ressources et préservation des milieux, tout en favorisant le développement économique local (Capellaro et al., 2020). Cette démarche s'inscrit

également dans les objectifs stratégiques européens. Le plan « Fermer la boucle » (European Commission, 2020) encourage notamment à restaurer la qualité des sols et à réduire l'artificialisation des territoires en valorisant la réutilisation des terres dégradées. Il s'agit ainsi de limiter la consommation de nouvelles surfaces non aménagées, en privilégiant une gestion plus durable et intégrée des ressources locales.

2.7. Matériaux à faible impact et économie circulaire

L'évolution des pratiques constructives s'inscrit aujourd'hui dans un contexte où les enjeux liés à la raréfaction des ressources, à l'impact carbone et à la pression foncière imposent une transformation profonde des modèles en place. Le secteur de la construction, à la croisée de ces dynamiques, représente une opportunité stratégique pour expérimenter et mettre en œuvre de nouvelles logiques de production et d'usage des matériaux, en lien direct avec les ressources et les besoins des territoires.

Les travaux du World Economic Forum et de McKinsey ont démontré que la transition vers une économie circulaire appliquée au secteur du bâtiment pourrait permettre de réduire jusqu'à 75 % des émissions de CO₂ incorporées dans six matériaux majeurs (ciment, acier, aluminium, verre, plastiques et plâtre), soit environ 4 gigatonnes d'ici 2050, tout en générant près de 360 milliards de dollars de bénéfices nets par an à l'échelle mondiale (Word Economic forum & McKinsey, 2024). Cette perspective n'implique pas uniquement des changements techniques. Elle engage une reconfiguration des chaînes d'approvisionnement, des pratiques de conception et des relations entre les acteurs du territoire. Concevoir pour déconstruire, prolonger la durée de vie des bâtiments, intégrer le réemploi ou encore limiter la consommation de ressources neuves deviennent autant de leviers pour renforcer la soutenabilité du cadre bâti (Word Economic forum & McKinsey, 2024). Ces stratégies permettent non seulement de réduire l'impact environnemental global, mais aussi de réinscrire la construction dans des dynamiques locales : relocalisation des filières, création de circuits courts pour les matériaux, mobilisation des savoir-faire artisanaux ou régionaux. En s'appuyant sur les ressources déjà disponibles dans l'environnement proche (qu'il s'agisse de matériaux issus de la démolition / Ecosourcés , de matières biosourcées ou géosourcées), la construction devient un champ d'innovation ancré dans le territoire. Elle dépasse alors le bâtiment pris isolément pour participer à une relecture plus large des flux, des usages et des valeurs associées à l'acte de bâtir.

Dans ce cadre, la remise en question des pratiques extractives classiques ouvre aujourd'hui un champ d'exploration vers des matériaux et des pratiques plus respectueux de l'environnement et davantage ancrés dans les dynamiques territoriales. Cette évolution n'est pas seulement technique : elle reflète une transformation progressive du rapport que les sociétés entretiennent avec le sol, la matière et le territoire, en rupture avec une logique de consommation linéaire et déconnectée des milieux. Cette situation encourage l'exploration de ressources alternatives, capables de répondre aux besoins constructifs tout en réduisant significativement les pressions exercées sur les écosystèmes.

Les matériaux dits « alternatifs » ne sont pas nouveaux en soi ; nombre d'entre eux ont une longue histoire d'usage vernaculaire, mais ils retrouvent aujourd'hui une pertinence particulière dans les réflexions contemporaines sur la durabilité. Les institutions internationales encouragent le développement de matériaux alternatifs. Le rapport du *Global Alliance for Buildings and Construction* (2023) souligne la nécessité d'accélérer l'innovation dans les matériaux durables pour atteindre les objectifs climatiques fixés par l'Accord de Paris, notamment en développant des filières locales bas-carbone . Ces matières présentent des avantages notables : leur disponibilité locale, leur faible transformation industrielle, leur capacité à stocker du carbone ou encore leur potentiel de réversibilité (Habert et al., 2020). Contrairement aux produits industriels standardisés, ils s'intègrent souvent dans des logiques constructives plus sobres et adaptées aux spécificités des territoires.

Le développement de ces matériaux ne peut toutefois se faire sans une évolution des cadres réglementaires, des pratiques professionnelles et des regards portés sur la matière. Il ne s'agit pas simplement de substituer une ressource à une autre, mais bien de redéfinir les critères de qualité, de performance, d'approvisionnement et de valeur dans l'architecture et l'urbanisme. Leur mise en œuvre appelle ainsi à un décloisonnement entre technique, territoire et culture, en s'appuyant sur des ressources qui ne sont plus simplement vues comme matière à extraire, mais comme éléments intégrés dans un système écologique et social à préserver. Plusieurs initiatives en Europe montrent que ces matériaux peuvent rivaliser avec les standards actuels, tant en termes techniques que symboliques, à condition de mobiliser des savoir-faire adaptés, de repenser les filières et de favoriser une approche transdisciplinaire de la construction (El Warcha et al., 2023)

Ces matériaux alternatifs ouvrent une réflexion plus large sur le rapport que la construction entretient avec la matière et le sol. En réintégrant la terre comme matériau de construction, par exemple, nous interrogeons la manière dont le sol est perçu : non plus uniquement comme support ou ressource, mais comme matière vivante, porteuse de récits culturels, d'usages ancrés, et de potentiels renouvelables. Cette réhabilitation des ressources oubliées ou marginalisées constitue un levier puissant pour amorcer une véritable transition écologique et culturelle dans le secteur de la construction.

3. Les sols et les terres comme matériaux en architecture

3.1. Terminologie : sol vs terre.

L'usage des mots « sol » et « terre » varie selon les contextes, suscitant parfois des confusions entre des réalités pourtant distinctes. Qu'il s'agisse de pratiques agricoles, de recherches scientifiques, d'aménagement du territoire ou de projets de construction, ces termes reviennent fréquemment, porteurs de sens multiples. Leur proximité linguistique et leur emploi courant rendent d'autant plus nécessaire une mise en lumière des nuances qu'ils recouvrent. Comprendre ce qui les différencie suppose d'examiner les domaines dans lesquels ils s'inscrivent et les fonctions qu'on leur attribue.

Le sol est défini scientifiquement comme étant la couche superficielle de l'écorce terrestre, formée par l'altération physique, chimique et biologique des roches mères sous l'influence combinée du climat, de la topographie, de la végétation, des organismes vivants et du temps (Brady & Weil, 2016). Cette couche, généralement épaisse de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres, selon les conditions environnementales et la nature de la roche mère, se caractérise par une structure stratifiée en horizons (couches) et une activité biologique intense, allant de la matière organique en surface à la roche altérée en profondeur. En pédologie, le sol est perçu comme un système vivant, dynamique et organisé, composé de minéraux, de matière organique, d'eau, d'air et d'une diversité d'organismes, essentiel à la fertilité des écosystèmes, à la régulation du cycle de l'eau, au stockage du carbone, et plus largement à la stabilité des paysages (FOA, 2015).

La terre, quant à elle, désigne généralement la fraction meuble du sol, principalement constituée de particules minérales (argile, limon, sable, gravier) et, selon les usages, d'une part variable de matière organique. En agriculture ou en jardinage, le terme « terre » est souvent utilisé à tort pour qualifier la terre végétale, c'est-à-dire la partie supérieure du sol riche en humus, en constituant organique et en éléments nutritifs (Dequincey, 2022). Cependant, en géologie et dans le domaine de la construction, la « terre » fait référence au matériau extrait du sol, utilisé comme matière première pour la fabrication d'éléments de construction (pisé, adobe, torchis, etc.). Ici, la terre est choisie pour ses qualités physiques et mécaniques, et peut être préparée ou modifiée pour répondre à des exigences techniques spécifiques (Houben & Guillaud, 1995). Ainsi, si le sol est un système complexe, vivant et structuré, la terre en est souvent une composante solide particulièrement riche en minéraux, formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et des mécanismes de migration des particules. Il en résulte une infinité de sorte de terre avec une variation de caractéristique illimitée, basée sur quatre propriétés fondamentales, la granulométrie, la plasticité, la compressibilité et la cohésion.

3.2. Formation et constitution des sols

Les sols résultent de la transformation de la roche mère sous l'influence de divers processus physique, chimique et biologique liés aux conditions bioclimatiques et à la vie animale et végétale. Leur évolution s'opère selon trois grands processus, plus ou moins simultanés (Brady & Weil, 2016).

La première est l'altération de la roche mère : exposée à l'air libre, elle subit l'action du climat (pluie, chaleur, gel...), ce qui la fissure et la transforme peu à peu en particules plus fines, à la fois par des processus physiques et chimiques.

Dans un second temps, cette matière altérée est enrichie par l'action des êtres vivants (plantes, micro-organismes, animaux), qui apportent des substances organiques comme l'humus. Cela donne au sol une composition plus stable, avec des propriétés physiques et chimiques spécifiques.

Enfin, lors du troisième processus, les éléments solubles (comme certains minéraux ou sels) migrent dans le sol sous l'effet de l'eau. Selon le climat, ils peuvent descendre en profondeur (en zone humide) ou remonter vers la surface (en zone sèche). Ce phénomène forme une structure en couches superposées, appelées horizons, qui définissent le profil du sol ou profil pédologique (Brady & Weil, 2016).

De ce fait on peut rencontrer deux types de sols : Les sols jeunes ou peu évolués, peu profonds et peu différenciés de la roche mère, souvent constitués d'un seul horizon ; et les sols évolués, profonds, caractérisés par une succession d'horizons lessivés et enrichis (Houben & Guillaud, 1995). Un carottage pratiqué dans le terrain, comme l'illustre la figure 8, permet d'observer les différents horizons du sol. En surface, l'horizon organique (**O**) contient des matières organiques en décomposition (feuilles, débris végétaux, etc.). Présent surtout en forêt ou en zones non cultivées. Il est suivi par l'horizon minéral organique (**A**), où la matière organique se mélange aux minéraux issus de la roche mère. Il s'agit d'une couche fertile où les racines se développent le plus, et est de couleur généralement sombre à cause de l'humus. Plus en profondeur, il existe parfois l'horizon éluvial (**E**) qui est une zone de lessivage, de perte de minéraux et de matière organique dissoutes, souvent de couleur plus claire. Ensuite, l'horizon illuvial (**B**) se distingue par l'accumulation de minéraux lessivés depuis les couches supérieures, tels que les argiles ou les oxydes de fer. Il est généralement moins riche en matière organique, donc propice à l'extraction des terres à bâtir, doté d'une texture plus compacte, et d'une coloration rougeâtre. Par la suite, l'horizon (**C**) correspond à la roche mère altérée, qui constitue la réserve minérale du sol. Enfin, l'horizon (**R**) qui correspond à la roche mère non altérée et compact, faisant parti du sous sol (Brady & Weil, 2016).

La composition de chaque horizon, dépend de plusieurs facteurs (Jenny, 1994). D'abord, la roche mère (ou matériau parental) détermine la base minérale du sol, influençant sa texture (argile, sable, limon, etc.). Le climat agit sur la vitesse d'altération des minéraux et sur la circulation de l'eau dans le sol. La topographie (relief) joue un rôle dans le drainage, l'érosion et le dépôt de matériaux. Les organismes vivants (plantes, micro-organismes, animaux du sol) transforment la matière organique et influencent la structure du sol. Le temps permet à ces

processus de faire évoluer et différencier les horizons (FOA, 2015). Enfin, les activités humaines (agriculture, urbanisation, extraction) modifient aujourd'hui profondément la composition et la structure des sols (Jenny, 1994).

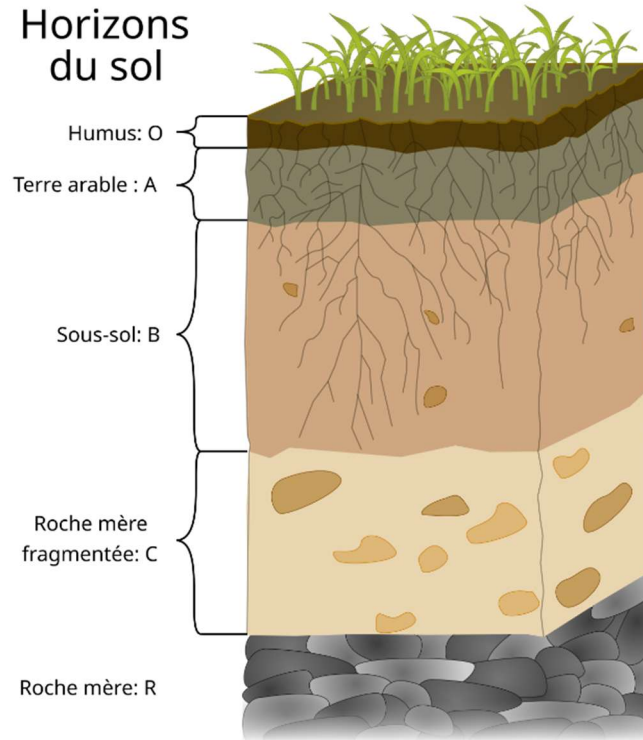


Figure 8. Les différents horizons d'un profil de sol. Crédit : Wilsonbiggs 2023

Loin d'être un milieu homogène, le sol présente une structure complexe, composée de plusieurs types de constituants qui interagissent constamment. Ces constituants se répartissent en trois catégories principales : les constituants solides, les constituants liquides, et les constituants gazeux. La compréhension de ces éléments est indispensable pour évaluer la nature d'un sol.

Les constituants solides forment la base physique du sol. Ils sont constitués de grains minéraux de tailles variées (*figure 9*) : cailloux, gravier, sables, silts, argiles et colloïdes (Houben & Guillaud, 1995). Ces particules proviennent de la désagrégation mécanique ou chimique de roches mères. Leur répartition détermine ce que l'on appelle la texture du sol, une propriété fondamentale qui influence son comportement face à l'eau, à l'air, à la pression exercée par les structures ou les activités humaines. Les grains grossiers comme les sables et les graviers confèrent au sol une grande perméabilité, tandis que les particules plus fines, comme les argiles, créent des sols plus compacts, susceptibles de retenir l'eau mais aussi de se déformer. À ces éléments minéraux s'ajoute une fraction organique, composée de résidus végétaux et animaux en décomposition. Bien que souvent en faible quantité, cette matière organique joue un rôle majeur dans la cohésion du sol, dans sa capacité à retenir l'eau et dans l'activité biologique qui s'y développe (Houben & Guillaud, 1995).



Figure 9. Les composants solides de la terre crue. Crédit : Fontaine et al., 2009, p. 102

Cependant, les constituants solides ne forment pas un assemblage compact. Ils laissent entre eux des espaces vides, que l'on appelle la porosité du sol. Ces vides sont essentiels car ils accueillent les deux autres types de constituants. La porosité permet au sol d'agir comme un système d'échange, de circulation et de régulation. Elle influence directement la manière dont l'eau s'infiltre, s'écoule ou est stockée, ainsi que la diffusion des gaz. Le comportement mécanique d'un sol, sa capacité à supporter des charges, à résister à l'érosion ou aux glissements, dépend aussi de sa porosité et de la répartition de ses grains (Houben & Guillaud, 1995).

Les constituants liquides, principalement l'eau, remplissent une partie de ces vides. Cette eau joue un rôle fondamental dans le transport des substances dissoutes (comme les sels minéraux ou les polluants). Elle agit aussi comme un liant entre les grains, influençant la cohésion du sol (Houben & Guillaud, 1995). Un sol saturé en eau peut devenir instable, voir glissant ou gonflant, ce qui pose des enjeux majeurs en construction ou en aménagement du territoire.

Pour finir, **les constituants gazeux**, principalement de l'air, occupent les pores qui ne se sont pas saturés d'eau. Cet air du sol contient de l'oxygène, du dioxygène de carbone et d'autres gaz, et il est essentiel à la respiration des micro-organismes et de nombreuses racines végétales. L'absence d'air, notamment dans les sols compactés ou gorgés d'eau, entraîne des déséquilibres biochimiques, une baisse de l'activité biologique, voire des dégradations de la structure du sol (Houben & Guillaud, 1995).

3.3. Histoire des terres à bâtir

Depuis les débuts de l'humanité, l'homme a toujours trouvé dans la terre crue un allié pour se construire un abri. Utilisée dès les premières périodes du Néolithique, elle fait partie des matériaux de construction les plus anciens et les plus répandus au monde, comme on peut le voir sur la figure 10. Thierry Joffroy souligne que l'usage de la terre, ne s'est jamais vraiment interrompu, traversant les époques et les continents. « Au-delà de la diversité des formes, des techniques et des fonctions, l'architecture de terre reflète une profonde adaptation aux milieux, aux sociétés, et aux savoir-faire locaux. » Autrement dit, c'est une matière qui porte en elle la mémoire des civilisations (Joffroy, 2016).

Des plaines du Moyen-Orient aux hauts plateaux d'Amérique latine, en passant par les vallées africaines et les collines d'Europe, la terre crue s'est exprimée sous des formes multiples : pisé,

adobe, torchis, bauge... On est bien loin d'une pratique marginale (Paulus, 2015) : il s'agit d'un langage architectural universel, sans cesse réinventé selon les contextes culturels, climatiques et sociaux. Ces constructions dites « vernaculaires » témoignent d'une grande richesse technique et culturelle. Elles incarnent un lien étroit entre l'homme, son territoire et les matériaux disponibles. Pourtant, ce savoir, longtemps transmis de manière orale, a peu à peu été relégué au second plan. Avec l'arrivée de l'industrialisation, du béton et de l'acier, les techniques liées à la terre crue ont été dévalorisées, parfois même perçues comme archaïques ou réservées aux populations pauvres (Joffroy, 2016). Le XXe siècle a largement ignoré cet héritage ancestral. Patrice Doat parle à ce sujet d'une rupture profonde : la perte d'un lien essentiel entre l'homme et la matière, entre l'individu et sa communauté, entre l'architecture et son environnement (Patrice Doat et al., 1979).



Figure 10. Architecture de terre dans le monde. Crédit : CRATerre. Org

Mais cette mémoire, un temps oublié, connaît aujourd'hui un retour prometteur. Dès le XVIIIe siècle déjà, certains, comme François Cointeraux, ont tenté de remettre la terre au cœur des préoccupations architecturales. Précurseur en la matière, il a été le premier à écrire et publier des traités sur la construction en pisé, qu'il souhaitait promouvoir dans les campagnes françaises, à une époque où ces techniques étaient peu valorisées (Joffroy, 2016).

Aujourd'hui, face aux défis environnementaux, sociaux et économiques, la terre crue redevient une solution d'avenir. Des architectes plus anciens comme Hassan Fathy ou plus récent comme Anna Heringer, ainsi que les chercheurs du CRATerre, lui redonnent vie avec une approche moderne, centrée sur la durabilité et l'implication des habitants. Pour Thierry Joffroy, ce regain d'intérêt ne relève pas de la nostalgie : elle répond à un besoin actuel d'architecture plus respectueuse des équilibres écologiques et des réalités humaines (Joffroy, 2016).

3.4. Propriétés, identification et techniques de mise en œuvre des terres à bâtir

Les propriétés d'un sol varient fortement d'un lieu à l'autre selon la répartition de ses fractions granulaires : cailloux, graviers, sables, limons/silts, argiles, colloïdes, matières organiques, ainsi que les proportions d'eau et de gaz (Houben & Guillaud, 1995). Les constituants dominants définissent donc le comportement de la matière : un excès d'argile favorise les fissures ; une dominante sableuse réduit la cohésion ; trop de matière organique accroît la porosité, diminue la durabilité en présence d'eau et rend les propriétés mécaniques instables (Houben & Guillaud, 1995). La qualité d'une terre dépend donc d'un ensemble de caractéristiques physiques qui conditionnent sa mise en œuvre, sa durabilité et son évolution dans le temps.

Pour évaluer l'aptitude d'une terre à la construction, il est nécessaire d'examiner quatre propriétés principales. La **granularité**, ou texture, indique la répartition des différentes tailles de grains et se mesure par analyse granulométrique pour les éléments grossiers et par sédimentométrie pour les particules fines, comme les argiles. La **plasticité** traduit la capacité de la terre à se déformer sans se fissurer ni se désagréger, permettant ainsi un façonnage sans perte de cohésion. La **compressibilité** caractérise l'aptitude du sol à se densifier sous une énergie de compactage donnée et à un taux d'humidité précis. Enfin, la **cohésion** reflète la capacité des particules à rester solidaires sous traction, une propriété directement liée à la présence et à la qualité des argiles, qui assurent le collage ou la cimentation du matériau (Houben & Guillaud, 1995).

Une identification précise de la terre constitue donc une étape déterminante dans le choix des techniques de transformation et de mise en œuvre adaptées à sa valorisation en tant que matériau de construction. Bien qu'un grand nombre de tests puissent être réalisés, seuls quelques-uns offrent une lecture directe de la compatibilité de la terre avec un usage constructif, et s'avèrent donc réellement pertinents. Ces essais se divisent en deux catégories : les tests de terrain et ceux effectués en laboratoire. Tous deux apportent des éléments indispensables à la prise de décision, mais les essais de terrain ont également l'avantage de pouvoir indiquer si des analyses en laboratoire, plus complexes, chronophages et onéreuses, sont nécessaires.

Analyses préliminaires sur le terrain

L'évaluation d'une terre pour la construction commence par des observations et tests simples sur site. **L'examen visuel** permet de repérer les éléments grossiers comme graviers et gros grains de sable, donnant une première idée de la texture et des caractéristiques mécaniques du sol. **L'odeur** révèle la présence de matière organique décomposée, signe d'une possible instabilité. Les essais tactiles, comme **la morsure**, **le toucher**, **le lavage** ou **l'adhérence**, aident à apprécier la granularité fine, la plasticité et la cohésion, tandis que **l'éclat** indique la capacité de la terre à conserver une surface lisse ou terne après coupe. Des tests plus spécifiques, tels que **la sédimentation**, **le cigare**, **la pastille**, **le Carazas** ou **l'observation du retrait**, renseignent sur la répartition des grains, la résistance à sec, la plasticité, la cohésion et la compressibilité, offrant une vision complète du comportement du sol selon son humidité et sa texture (Houben & Guillaud, 1995 ; Paulus, 2015).

Tests d'identification en laboratoire

En laboratoire, les analyses permettent de quantifier précisément les propriétés du sol. La **granulométrie** et la **sédimentométrie** établissent la répartition des grains grossiers et fins, essentielle pour la texture et la portance. Les **limites d'Atterberg** évaluent la plasticité des sols fins et argileux, et permettent de calculer l'indice de plasticité, le potentiel de retrait et la maniabilité du sol. L'**essai Proctor** détermine la teneur en eau optimale pour un compactage maximal, tandis que l'**essai de cohésion** (ou essai du 8) mesure la résistance à la traction et la stabilité du matériau humide. Enfin, l'**analyse minéralogique**, notamment via le test d'Emerson, identifie les argiles influentes sur la cohésion et la stabilité volumique, informations cruciales pour décider d'éventuelles stabilisations (Houben & Guillaud, 1995).

Au-delà des propriétés physiques des terres à bâtir, la diversité des constructions en terre dans le monde révèle une grande variété de méthodes, façonnées par les conditions climatiques, les ressources locales, les usages et les traditions. Chaque région a ainsi développé des pratiques adaptées à son contexte, ce qui explique la richesse des typologies observées (Brady & Weil, 2016). Pour évaluer la pertinence d'un sol pour un projet donné, Houben (1995) propose de se poser plusieurs questions : type d'ouvrage, environnement, techniques maîtrisées localement, usage du bâtiment et moyens disponibles. Cette réflexion permet de relier les caractéristiques du sol aux choix constructifs et de réévaluer les compromis entre matériau, technique et contexte (Houben & Guillaud, 1995). Si la terre ne répond pas aux exigences d'une méthode, plusieurs solutions existent : la **stabilisation** (ajout de chaux, ciment, fibres), la **modification de la composition** (sable, limon, argile), ou l'**adaptation de la technique** elle-même pour tirer parti des propriétés réelles du matériau. Cette flexibilité favorise un équilibre optimal entre matériau, technique et besoins spécifiques, tout en respectant les contraintes environnementales, économiques et culturelles.

Pour synthétiser ces approches, Houben et Guillaud (1995) ont proposé une classification des techniques de construction en terre, présentée sous forme de « roue » regroupant douze méthodes principales (*figure 11*). Parmi elles, les plus répandues sont le **pisé**, l'**adobe**, le **torchis**, la **bauge** et les **briques de terre comprimée (BTC)**. Néanmoins, les auteurs soulignent que la réalité est bien plus vaste, avec une centaine de variantes, issues d'innovations locales, d'évolutions culturelles ou d'adaptations aux matériaux disponibles, chaque technique nécessitant donc un type de terre spécifique.

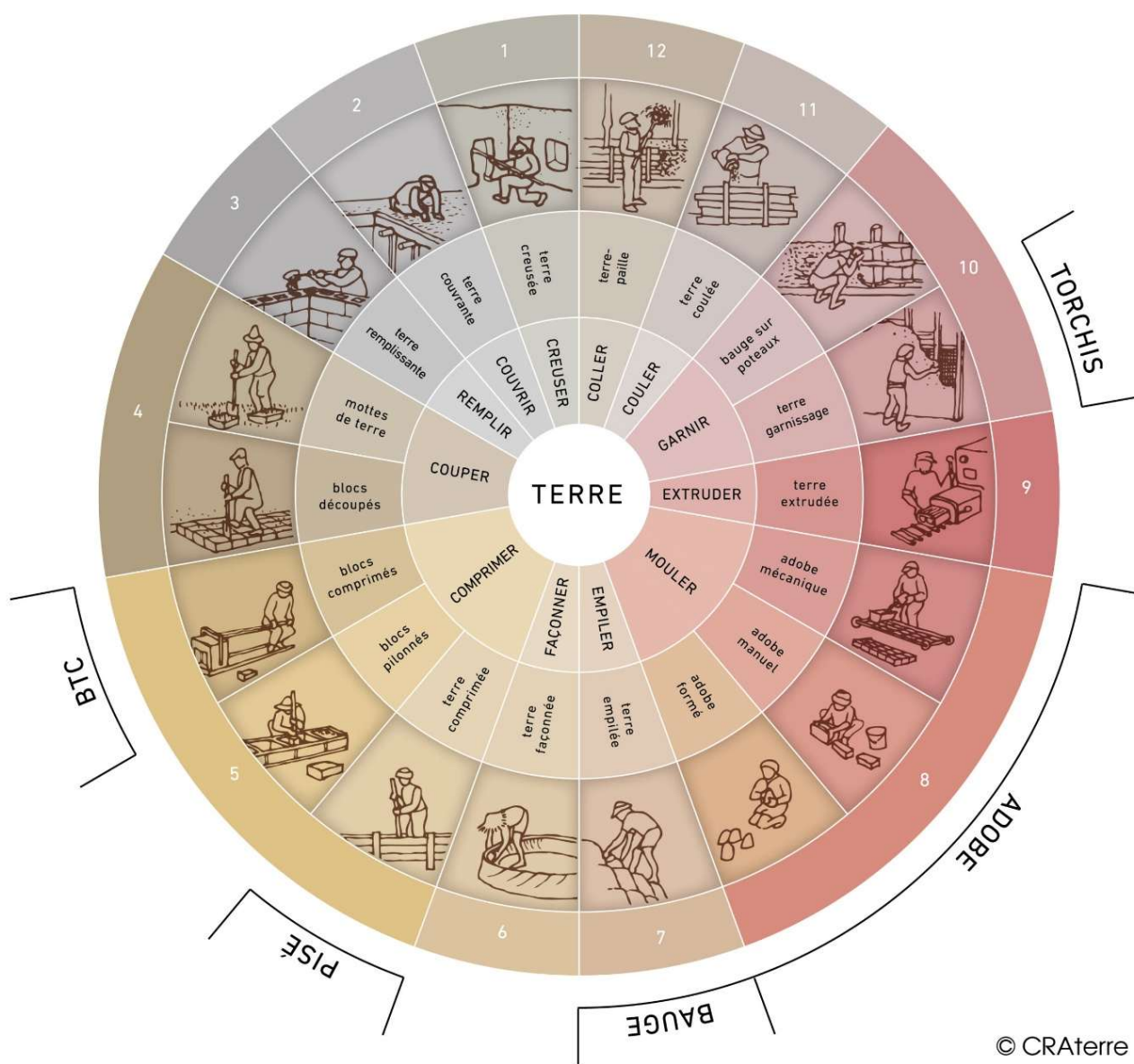


Figure 11. "Roue" des techniques de construction en terre. Crédit : CRATerre. Org

Le procédé de terre comprimée, correspond respectivement aux techniques des blocs de terre comprimée (BTC) et à celle du pisé. Concernant la technique du BTC, il s'agit d'une méthode relativement récente : à l'origine, les briques étaient fabriquées manuellement dans des moules, puis compressées par pilonnage manuel (*figure 12*). La technique a ensuite rapidement évolué avec l'apparition de la toute première presse, imaginée par un Français au XVIII^e siècle. Pour cette technique, la terre, humidifiée à un taux compris entre 5 % et 20 %, est compactée sous forte pression à l'aide d'une presse pour former des blocs homogènes, réguliers et résistants. Cette méthode, largement répandue, est particulièrement adaptée aux constructions modulaires ou répétitives (Houben & Guillaud, 1995).

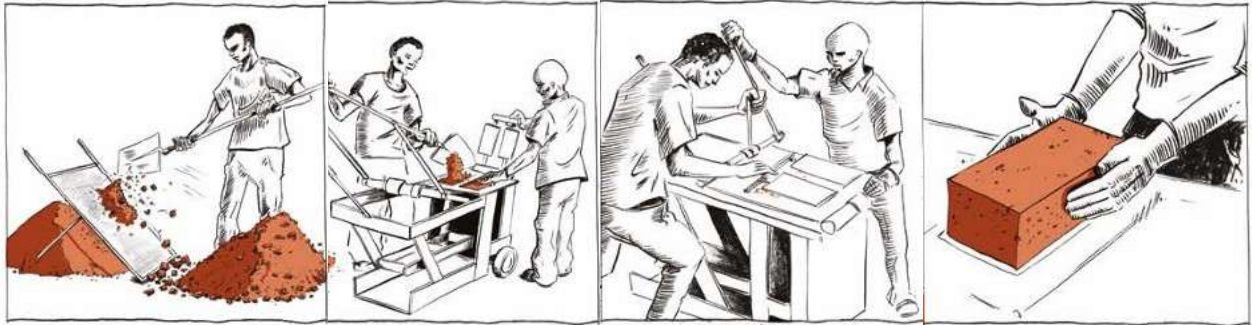


Figure 12. Procédé de fabrication de blocs de terre comprimée (BTC). Crédit : Pauline Sémon (2016)

Quant à la technique du **pisé**, parfois appelée terre coffrée comprimée, il s'agit d'une technique bien plus ancienne, apparue pour la première fois à Carthage, en Tunisie. Elle consiste à tasser la terre humidifiée par couches successives dans des coffrages verticaux (*figure 13*). On obtient ainsi des murs massifs à forte inertie thermique. Le pisé combine compacité et esthétisme brut, ce qui en fait une technique toujours valorisée dans l'architecture contemporaine. Étant donné l'utilisation de coffrages et la granulométrie de la terre utilisée, cette technique de construction est celle qui se rapproche le plus du béton. Les termes « béton d'argile » ou « béton de terre » sont d'ailleurs largement utilisés pour désigner le pisé (Anger & Fontaine, 2009). À cause de l'intensité du travail, le pisé est un matériau haut de gamme dans les pays industrialisés, et des entrepreneurs comme Martin Rauch expérimentent la préfabrication pour baisser les coûts. Dans certains pays la réglementation exige une stabilisation avec environ 10 % de ciment (Gauzin-Müller et al., 2016).

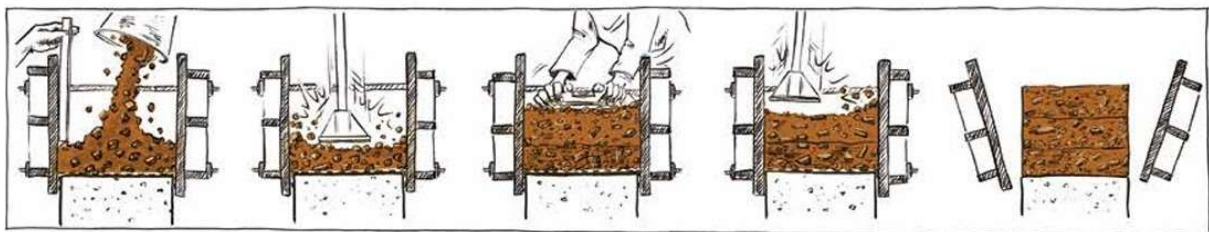


Figure 13. Procédé de réalisation du pisé. Crédit : Pauline Sémon (2016)

Le procédé de terre empilée, qui correspond à la méthode traditionnelle de **la bauge**. Il s'agit d'une tradition constructive relativement ancienne, datant de plusieurs millénaires avant J.-C. Dans cette méthode, la terre, à l'état plastique (taux d'humidité compris entre 15 et 30 %), est simplement déposée en tas ou en bandes épaisses, sans moule ni coffrage, directement sur les

couches précédentes après un court temps de séchage (*figure 14*). Cette méthode artisanale est adaptée aux constructions rurales ou à l'auto-construction, où la simplicité d'exécution prime sur la régularité des formes. La terre utilisée pour cette technique ne doit pas contenir trop de cailloux ni de graviers, car la mise en œuvre des boules de terre se fait à la main. Selon la région, la terre sera donc plus sableuse ou, au contraire, plus fine et argileuse. Elle est souvent amendée de fibres végétales pour limiter le risque de fissuration (Anger & Fontaine, 2009).

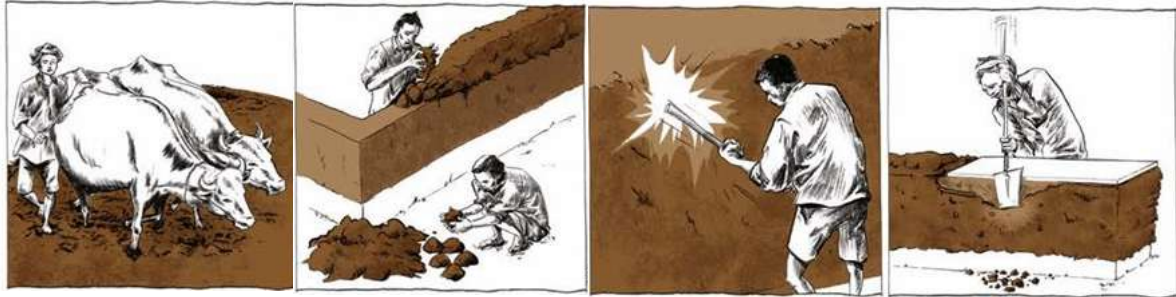


Figure 14. Procédé de réalisation de mur en Bauge. Crédit : Pauline Sémon (2016)

Le procédé de terre mouler, qui regroupe l'adobe mécanique, l'adobe manuel et l'adobe formé, qui renvoie à la fabrication **d'adobes**, c'est-à-dire de briques moulées à partir de terre plastique ou légèrement visqueuse (taux d'humidité compris entre 15 et 35 %). Ces blocs sont façonnés manuellement ou à l'aide de moules, puis séchés naturellement à l'air libre avant d'être maçonnés avec un mortier de terre (*figure 15*). Très répandue dans les régions chaudes et sèches, cette méthode offre une excellente régulation thermique ainsi qu'une grande adaptabilité aux ressources locales. La terre utilisée pour la fabrication des adobes présente une granulométrie relativement fine : elle ne doit contenir ni cailloux ni graviers, en raison des petites dimensions des moules et du travail manuel impliqué. Elle ne doit pas non plus être trop argileuse, afin d'éviter les fissurations lors du séchage. Pour limiter ces dernières, on peut également y ajouter du sable ou des fibres végétales (Anger & Fontaine, 2009)

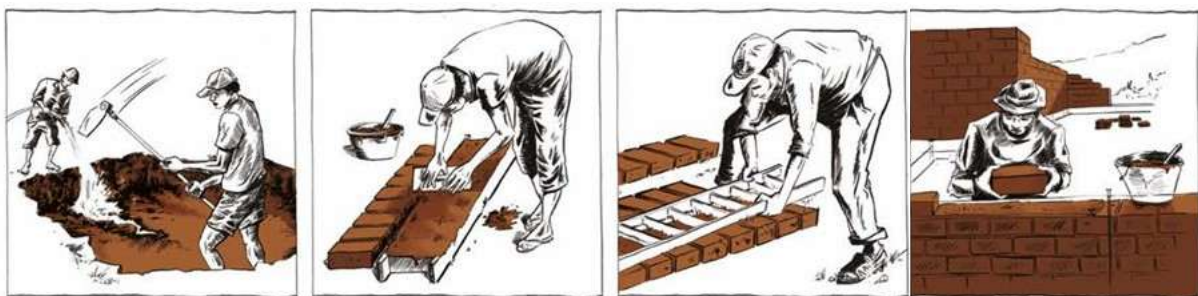


Figure 15. Procédé de réalisation de mur en Adobe. Crédit : Pauline Sémon (2016)

Enfin, le procédé de terre de garnissage, qui renvoie au **torchis**, consiste à appliquer un mélange terreux malléable sur un support ajouré. Celui-ci est souvent constitué d'un lattis en bois, en osier ou en bambou, fixé entre des poteaux appelés colombes ou intégré dans une ossature porteuse en bois, dite colombage. Ce type de structure, légère et rapide à assembler, est ensuite recouvert d'une terre fine, à texture limono-argileuse et naturellement collante (*figure 16*). Comme ces terres contiennent peu de sable, elles sont sujettes aux fissurations lors du séchage.

Pour y remédier, on y incorpore des fibres végétales, le plus souvent de la paille, qui améliorent également l'isolation thermique du matériau (Anger & Fontaine, 2009). Certaines adaptations modernes de cette méthode existent : au Chili, Marcelo Cortes a appliqué le principe du torchis sur des armatures métalliques, tandis qu'en Allemagne, Franz Volhard a mis au point la « terre allégée », un mélange de paille et de barbotine argileuse offrant de meilleures performances thermiques (Gauzin-Müller et al., 2016).



Figure 16 . Procédé de réalisation de mur en Torchis. Crédit : Pauline Sémon (2016)

3.5. Stabilisation de la terre crue

La stabilisation des terres à bâtir consiste à modifier l'organisation de leurs phases solides, liquides et gazeuses afin d'améliorer leurs performances et de les adapter à un usage précis. Cette intervention peut passer par l'ajout de stabilisants adaptés à chaque type de terre ou par un simple ajustement des proportions d'argile, de sable et de limon pour optimiser la granulométrie. Avant toute opération, il est essentiel d'analyser les propriétés de la terre, les objectifs d'amélioration, les contraintes économiques, les méthodes de mise en œuvre et la maintenance future, car la stabilisation peut augmenter le coût du matériau de 30 à 50 % et nécessite des études préalables (Paulus, 2015).

Les objectifs principaux sont de réduire la porosité pour accroître la compacité, de limiter la perméabilité pour freiner les échanges d'eau et d'air, et de renforcer la cohésion interne afin d'améliorer la résistance mécanique. Ces résultats peuvent être obtenus par différents procédés : mécaniques (compression), physiques (ajustement de la granulométrie, traitements thermiques ou électriques) ou chimiques (ajout d'additifs minéraux, organiques ou synthétiques) (Houben & Guillaud, 1995). Un même stabilisant peut combiner plusieurs modes d'action, et leur classification peut se faire selon leur nature (végétale, animale, minérale ou synthétique) ou selon leur forme, comme poudre, fibre, liquide ou pâte (Paulus, 2015).

On peut résumer les principales stratégies de stabilisation des terres en six axes (*figure 17*) :

1. **Densification** : augmenter la compacité en réduisant les vides par compression ou ajustement de la granulométrie.
2. **Renforcement** : intégrer des fibres ou armatures pour améliorer la résistance aux contraintes mécaniques.
3. **Cimentation** : consolider la structure par l'ajout de liants insolubles, comme le ciment, qui remplissent les vides.
4. **Adhésion** : améliorer la liaison entre particules via des stabilisants réactifs, notamment la chaux, pour former une matrice solide.
5. **Imperméabilisation** : limiter la pénétration d'eau en comblant les pores avec des matériaux hydrophobes ou expansifs, comme le bitume ou la bentonite.
6. **Hydrofugation** : protéger le matériau contre l'humidité ambiante en modifiant la sensibilité des argiles ou le mouvement de l'eau dans la terre (Houben & Guillaud, 1995).







MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES							
STABILISANT		NATURE	PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE	
SANS APPORT DE STABILISANT			MÉCANIQUE	DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES		
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE	ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT		
		FIBRES					
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE À TOUT MOUVEMENT		
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE		
		HYDRO-PHOBANTS		IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX		
				HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET ADSORPTION D'EAU		

Figure 17. Mécanismes de stabilisation. Crédit : Guillaud & Houben, 1995 : p. 81

Ces effets sont rendus possibles par des méthodes de stabilisation développées et perfectionnées au fil du temps. Les principales techniques sont :

Densification par compression.

La compression est une technique clé pour améliorer la compacité des terres. En réduisant les vides et en uniformisant leur distribution, elle augmente la résistance mécanique et diminue la porosité. Différentes méthodes existent : compression statique, vibration, impact dynamique ou malaxage intensif, chacune nécessitant un dosage précis en eau pour atteindre la densité optimale. L'efficacité dépend de l'énergie appliquée et de la granulométrie : un mélange bien réparti de grains assure un remplissage maximal des vides, tandis qu'un compactage trop faible ou trop intense peut nuire à la cohésion. Bien maîtrisée, la densification rend le matériau plus stable, moins perméable, moins sujet au gonflement ou à la déformation, et mécaniquement plus performant (Paulus, 2015).

Densification par gradation / Reformulation.

Pour accroître la résistance mécanique et la durabilité d'une terre, il est nécessaire de réduire sa porosité en optimisant le contact entre les particules, ce qui améliore sa cohésion (Houben & Guillaud, 1995). Cette optimisation peut être obtenue par correction granulaire, consistant à ajuster la proportion des fractions solides (graviers, sables, limons, argiles) afin d'obtenir une granulométrie équilibrée (Oqaidi, 2019). Une terre trop argileuse, par exemple, peut être amendée avec du sable ou du gravier pour limiter retrait et gonflement, et atteindre une densité optimale (Houben & Guillaud, 1995). Le succès de cette méthode repose sur un mélange

homogène, obtenu par un malaxage adapté à la nature et à la quantité des composants (Paulus, 2015).

Stabilisation par ajout de fibres.

L'intégration de fibres, qu'elles soient naturelles, synthétiques ou industrielles, constitue une technique ancienne et largement répandue pour améliorer la performance des matériaux à base de terre. Leur rôle principal est de renforcer la matrice argileuse en limitant ses points faibles. Les fibres, notamment la paille très couramment utilisée, agissent comme des armatures internes : elles réduisent le risque de fissuration lors du séchage en répartissant les tensions, favorisent l'évacuation de l'humidité tout en allégeant le matériau, et améliorent ses propriétés isolantes grâce à leur faible densité. De plus, elles confèrent au mélange une meilleure résistance à la traction, au cisaillement et, dans certains cas, à la compression, en freinant la propagation des fissures et en retardant la rupture de la structure (Paulus, 2015).

L'efficacité de ce procédé dépend toutefois de plusieurs paramètres : un dosage adapté, généralement autour de 4 % du volume total, car un excès provoque une perte de cohésion et de densité (Houben & Guillaud, 1995), et une répartition homogène des fibres dans toutes les directions pour que les contraintes soient transmises de manière équilibrée. Enfin, le choix du type de fibres (végétales, animales ou synthétiques) et leur adaptation à l'état de mise en œuvre de la terre (plastique, molle, ou compactée) jouent un rôle déterminant dans la performance finale du matériau.

Stabilisation au ciment.

La stabilisation au ciment consiste à incorporer un liant hydraulique, principalement le ciment Portland, afin d'améliorer durablement les propriétés mécaniques et la résistance des matériaux à base de terre. Initialement utilisée dans les travaux routiers dès le début du XX^e siècle, cette technique s'applique aujourd'hui à la construction en terre lorsque la durabilité doit être renforcée face aux contraintes climatiques ou structurelles. L'ajout de ciment accroît la résistance à la compression, aussi bien en conditions sèches qu'humides, et améliore la tenue à la traction, au cisaillement et aux efforts ponctuels (Paulus, 2015).

Un autre avantage majeur est la stabilité dimensionnelle : la réduction des retraits au séchage et des gonflements dus à l'humidité limite fortement les risques de fissuration et de déformation dans le temps. De plus, le matériau obtient une meilleure résistance à l'érosion, un point crucial dans les environnements soumis aux intempéries ou aux remontées capillaires. L'efficacité dépend toutefois du respect de certains paramètres. Un dosage de 6 à 12 % est généralement optimal, notamment pour les sols à dominante sableuse qui tirent le plus grand bénéfice de cette stabilisation. En revanche, les terres riches en matières organiques ou en sulfates peuvent réagir négativement et freiner la prise ; l'adjonction de chaux, de chlorure de calcium ou d'autres activateurs permet alors de compenser ces effets (Houben & Guillaud, 1995).

Des améliorations supplémentaires peuvent être obtenues en associant le ciment à de faibles quantités d'additifs : bitume pour accroître l'imperméabilité, agents limitant l'absorption d'eau, ou additifs sodiques pour activer les terres peu réactives (Houben & Guillaud, 1995).

Stabilisation à la chaux.

L'incorporation de chaux dans les sols est une technique efficace et polyvalente, particulièrement adaptée aux ouvrages en terre moulés par compression. Elle agit en modifiant la structure du matériau, renforçant sa cohésion interne et améliorant nettement ses performances mécaniques : les résistances à la compression se situent couramment entre 2 et 5 MPa, mais peuvent atteindre jusqu'à 40 MPa en production industrielle optimisée (Houben & Guillaud, 1995). La chaux réduit également les variations dimensionnelles dues au retrait et au gonflement des argiles, limitant ainsi les risques de fissuration ou de déformation. Une simple addition de 1 à 2 % peut, par exemple, ramener un retrait de 10 % à seulement 1 % et éliminer presque totalement le gonflement.

En terres argileuses, la chaux accroît la compacité, diminue la plasticité excessive et facilite la mise en forme, ce qui améliore la maniabilité du matériau. Elle présente aussi l'avantage de tolérer jusqu'à 20 % de matières organiques, offrant ainsi une plus grande diversité de sols exploitables, là où le ciment est fortement limité par leur présence (Paulus, 2015).

Le choix du liant est déterminant : les chaux aériennes sont particulièrement performantes pour les sols argileux ; la chaux vive, plus efficace à masse égale, reste moins utilisée en raison de ses contraintes de manipulation, tandis que la chaux éteinte, plus sûre, est la plus courante. Les chaux hydrauliques, naturelles ou artificielles, ne sont envisagées qu'en alternative. Les dosages optimaux se situent généralement entre 6 et 12 %, avec un ajustement précis selon la nature du sol pour garantir une réaction chimique complète et de bonnes performances (Houben & Guillaud, 1995).

Des additifs peuvent être intégrés pour améliorer certains aspects : un faible pourcentage de ciment ou de sulfate de sodium peut par exemple accroître la résistance ou activer des sols peu réactifs. Bien maîtrisée, la stabilisation à la chaux offre des matériaux durables, résistants aux contraintes climatiques et mécaniques, et adaptés à un usage moderne tout en valorisant les ressources disponibles localement (Paulus, 2015).

Stabilisation au bitume.

Peu utilisée aujourd'hui, la stabilisation au bitume présente un réel intérêt pour les sols sableux ou silteux. Enrobant les particules d'un film imperméable, il réduit fortement la perméabilité, améliore la cohésion et limite les gonflements liés à l'humidité (Houben & Guillaud, 1995). Cette action est renforcée par un malaxage liquide, qui accroît aussi la teneur optimale en eau et facilite la mise en forme.

Les dosages se situent généralement entre 2 et 3 %, pouvant atteindre 8 % pour des granulométries grossières, mais un excès agit comme un lubrifiant et réduit la résistance. La méthode convient aux sols riches en éléments granulaires et pauvres en argile ou en matières organiques ; en présence de sels ou de matières organiques (Paulus, 2015). L'efficacité peut être accrue par des additifs comme la chaux, le ciment ou certains agents chimiques (amines quaternaires, cires, anhydride phosphorique). Les performances dépendent du type et du dosage du bitume ainsi que d'une cure prolongée à l'air sec, indispensable pour atteindre la résistance finale (Houben & Guillaud, 1995).

Stabilisation à la résine.

La stabilisation des sols par résines synthétiques, largement utilisée dans les travaux publics, vise principalement à renforcer la résistance au cisaillement et à augmenter l'élasticité des couches superficielles, réduisant ainsi l'épaisseur nécessaire des couches stabilisées. Cette technique est particulièrement adaptée aux infrastructures routières ou industrielles, mais son usage en construction en terre crue est limité à des applications spécifiques comme les dallages ou surfaces fortement sollicitées (Houben & Guillaud, 1995).

Les résines offrent une prise rapide grâce à une réaction chimique énergique et une faible viscosité facilitant leur intégration dans les sols, y compris très humides. Cependant, leur coût élevé, leur complexité de production et leur disponibilité limitée aux zones industrialisées freinent leur généralisation. De plus, leur manipulation nécessite des précautions à cause des catalyseurs utilisés et des risques toxicologiques. Leur sensibilité à l'eau et leur nature biodégradable soulèvent des doutes sur leur durabilité à long terme, ce qui limite leur emploi malgré leurs hautes performances techniques (Houben & Guillaud, 1995).

Stabilisation aux produits naturels.

L'utilisation de stabilisants d'origine géologique, végétale ou animale repose sur des savoir-faire traditionnels et sur leur disponibilité locale. Bien que leurs performances restent généralement inférieures à celles des liants industriels, ils constituent des alternatives intéressantes dans des contextes spécifiques grâce à leur faible coût environnemental (Houben & Guillaud, 1995).

Les apports géologiques comme le sable, la bentonite ou les terres volcaniques modifient la texture des sols en améliorant compacité et imperméabilité, mais leur efficacité mécanique est limitée, sauf s'ils sont combinés à des liants comme la chaux ou le ciment. Les produits d'origine animale, tels que l'urine de cheval ou le sang de bœuf, peuvent renforcer la cohésion et réduire la fissuration, mais leur usage nécessite des conditions précises et leur disponibilité est restreinte. Les produits végétaux, comme les cendres, huiles ou gommes, offrent une bonne protection contre l'humidité, notamment les huiles siccatives comme le lin ou le ricin, mais leur action reste souvent superficielle et variable selon la préparation (Houben & Guillaud, 1995).

Stabilisation aux produits synthétiques.

Cette catégorie regroupe divers composés industriels ou sous-produits transformés, dont l'usage reste limité en raison de leur coût, de leur toxicité potentielle et d'une efficacité souvent conditionnée par la nature du sol (Houben & Guillaud, 1995).

Certains agents chimiques, comme l'acide fluorhydrique, peuvent être performants mais présentent un risque élevé et des résultats instables. Les bases fortes, notamment la soude caustique, assurent une bonne cimentation sur les sols latéritiques riches en aluminium, tout en étant incompatibles avec des argiles comme les montmorillonites ; elles nécessitent un dosage précis et une période de cure. Les sels peuvent améliorer résistance, compacité et perméabilité par floculation, mais leur effet est souvent temporaire à cause du lessivage.

Parmi les sous-produits industriels, certains, tels que les laitiers de hauts fourneaux ou les mélasses, peuvent limiter la capillarité ou renforcer la résistance, mais leur performance varie selon leur composition. La lignine imperméabilise efficacement sous forme de chromolignine, mais son prix reste élevé. Les cendres volantes, pouzzolanes ou soufre plastifié exigent généralement un complément de chaux pour être efficaces (Houben & Guillaud, 1995).

Enfin, le plâtre, adapté aux sols sableux, offre une prise rapide mais une faible tenue à l'eau ; associé à la chaux, il convient aux terres argileuses, mais il ne doit pas être mélangé au ciment (Houben & Guillaud, 1995).

Partie 2 – Enquête territoriale et stratégie de projet

4. Analyse du territoire du bassin versant de l'Orneau

4.1. Ressources géologiques et potentiel extractif

Dans un contexte de crises environnementales, sociales et économiques de plus en plus aiguës, il devient impératif de repenser notre manière d'habiter le territoire ainsi que notre rapport à l'exploitation des ressources du sol et du sous-sol. Les modèles extractifs actuels, fondés sur la recherche de matériaux aux qualités optimales et sur une exploitation intensive, montrent aujourd'hui leurs limites. Ils révèlent non seulement l'épuisement progressif des ressources naturelles, mais aussi une rupture profonde entre les territoires d'extraction et les espaces habités.

Ce projet s'inscrit dans une dynamique de transition et propose de reconsidérer les pratiques extractives, non seulement à travers la matière elle-même, mais aussi en intégrant les transformations territoriales qu'elles engendrent. L'ambition est double : développer une extraction régénérative, capable de restaurer les écosystèmes locaux, de s'inscrire dans le respect des cycles naturels et de recréer des liens sociaux à l'échelle du village, en réintégrant les activités extractives dans un cadre plus humain et durable ; mais aussi rapprocher production et usage, en proposant des matériaux de construction directement utilisables, réemployables et ne nécessitant pas de transformation industrielle lourde. Cette approche vise à réduire l'impact environnemental tout en valorisant les ressources locales, en instaurant une économie plus circulaire, ancrée dans le territoire. Pour nourrir cette réflexion, une analyse fine et une description approfondie du site seront menées, afin d'identifier les enjeux spécifiques et les défis à relever, et ainsi définir des modalités d'intervention adaptées. Ce travail préparatoire ouvrira la voie à des expérimentations concrètes et à l'émergence de nouvelles pistes pour penser une extraction plus respectueuse, résiliente et durable.

Le territoire étudié, situé dans le sous-bassin versant de l'Orneau, principalement localisé dans la province de Namur en Belgique (*figure 18*), se distingue par une richesse géologique issue principalement des périodes cambriennes, dévonienne et carbonifère. Cette configuration du sous-sol l'a rendu particulièrement propice à l'exploitation de ressources minérales. Selon Toussaint (1975), si l'usage de ces ressources existe depuis toujours, c'est surtout à partir du Xe siècle que leur exploitation s'intensifie, notamment pour la construction de systèmes défensifs et de châteaux. L'auteur cite en exemple la commune de Gembloux, où la construction des remparts comme système défensif du duché de Brabant face au comté de Namur, témoigne de cette dynamique. Ce développement marque le début d'un long cycle extractif qui se prolongera jusqu'au XXe siècle (Toussaint, 1975).

Ce passé extractif a profondément structuré le paysage et l'économie locale. Le territoire compte plusieurs dizaines d'anciens sites d'extraction, dont beaucoup sont aujourd'hui partiellement comblés, boisés ou réinvestis par la biodiversité (Durieux, 2015). Ces vestiges témoignent de l'intensité de l'activité minière, orientée principalement vers un marché de proximité pour répondre aux besoins en matériaux de construction. Quelques ressources de qualité exceptionnelle tel que le marbre noir du village Mazy, ont toutefois connu une

valorisation à l'échelle internationale (Durieux, 2015). Cette activité a également influencé l'implantation des villages, souvent situés à proximité des gisements, ainsi que la morphologie du territoire, marquée par un maillage dense de routes, de chemins d'accès et d'infrastructures de transport, comme le souligne également Toussaint (1975).

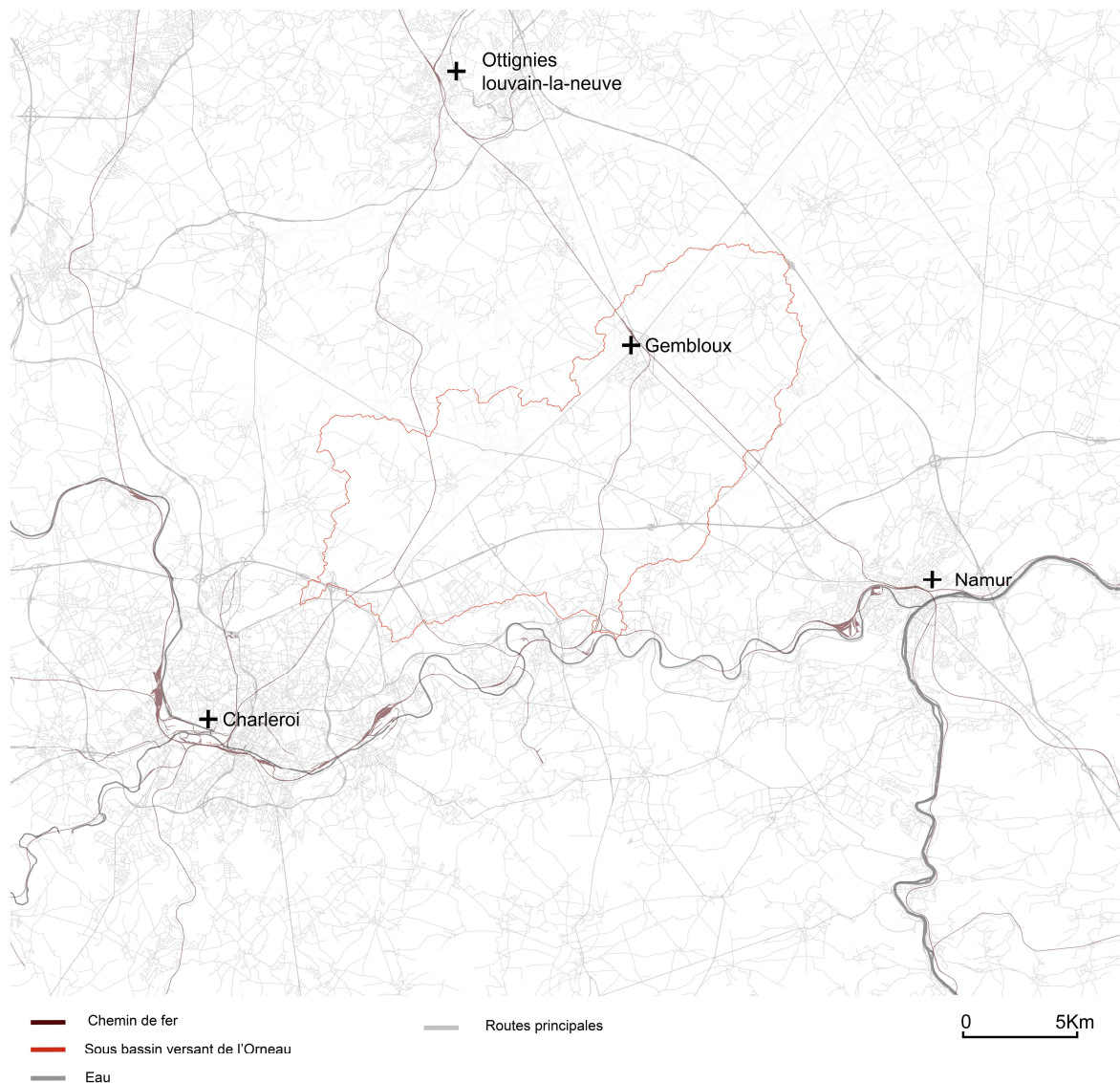


Figure 18. Situation géographique du sous bassin versant de l'Orneau. Crédit : Djike Daniel (2025)

Lors de notre première visite de terrain, seuls trois anciens sites d'extraction ont pu être localisés à l'aide de Google Maps, ce qui illustre les limites d'une observation basée uniquement sur des données cartographiques récentes. L'exploitation de sources documentaires historiques, rédigées par divers auteurs tels que Joseph Toussaint (1975), Georges Durieux (2015), Jean Leurquin (2013) ou encore Catherine Kaise (2002), a permis de reconstituer, de manière approximative, le nom des carrières, leurs périodes d'activité, les ressources exploitées, leurs usages et, dans certains cas, de décrire succinctement leur état actuel. Cependant, c'est l'analyse croisée d'une série de cartes géologiques et de notices explicatives mises à disposition par le Service géologique de la Wallonie qui a permis de franchir un cap décisif dans la démarche d'inventaire. Cette approche méthodologique a conduit à l'identification et à la localisation d'un

nombre bien plus significatif de sites, environ une centaine, présentant des tailles, des typologies, des profondeurs et des ressources exploitées très variées. Ce recensement étendu, assorti d'une classification selon le mode d'exploitation (à ciel ouvert, souterraine ou minière) (*figure 19*), met en évidence l'extrême hétérogénéité du patrimoine extractif local. L'analyse de leur répartition spatiale révèle par ailleurs une organisation quasi linéaire d'est en ouest, qui reflète directement la structure géologique du sous-sol, caractérisée par la succession de bandes de ressources exploitables. Ce schéma témoigne non seulement de la richesse et de la diversité des matériaux disponibles, mais aussi du rôle majeur qu'a joué l'activité extractive dans le façonnement historique, économique, social et même paysager du sous bassin versant de l'Orneau, dont l'aménagement du territoire porte encore aujourd'hui l'empreinte.

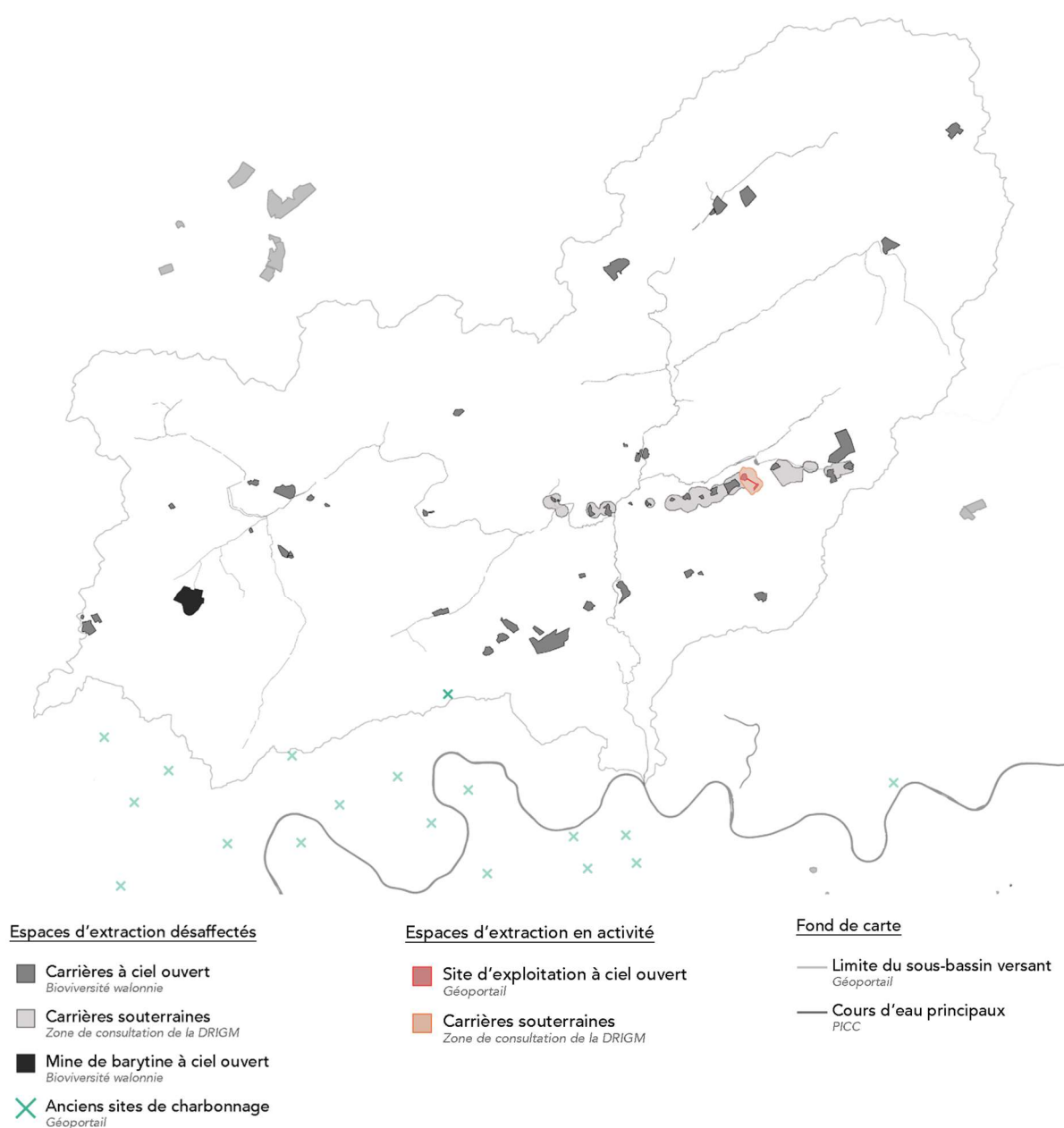


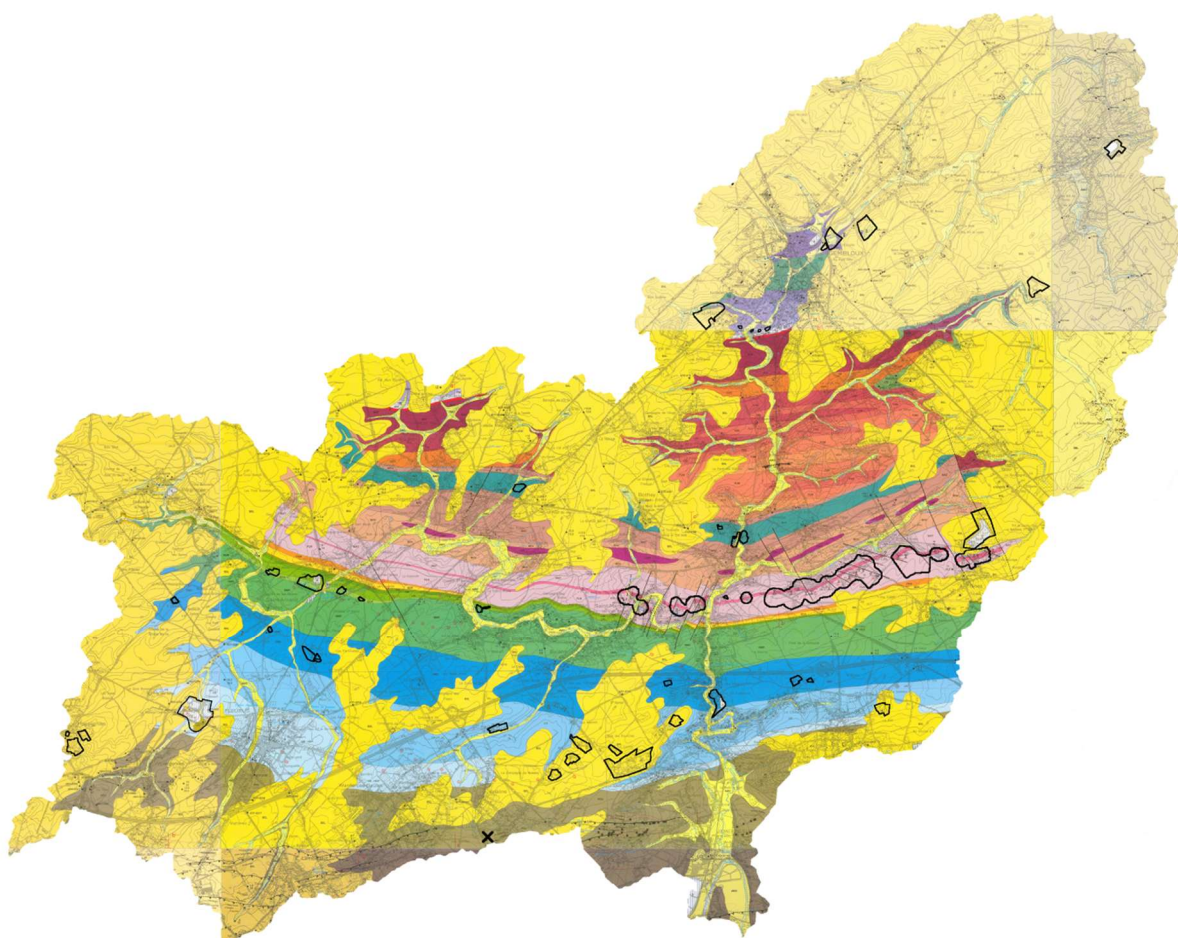
Figure 19. Sites d'extraction du sous-bassin versant de l'Orneau. Crédit : Groupe projet (2025)

Comme le montrent les figures 21 et 22, le croisement de ces données spatiales avec les cartes géologiques et pédologiques confirme la grande variété des ressources minérales présentes dans le sous-bassin de l'Orneau. Cette diversité ne se limite pas à la nature des matériaux, mais s'exprime également dans la pluralité de leurs usages, tant à l'échelle locale qu'internationale. Le calcaire, omniprésent dans le sous-sol régional, se décline en plusieurs variétés exploitées selon leurs propriétés spécifiques : certaines étaient destinées à la production de chaux, d'autres servaient à la taille de moellons pour la construction. Parmi elles, le marbre noir de Mazy, reconnu pour sa qualité esthétique exceptionnelle, a connu une renommée mondiale. Il a notamment été exporté pour orner des monuments prestigieux à travers le monde, comme le Taj Mahal, le châteaux de Versailles, ou même le château des Windsor, illustrant à quel point la ressource locale a pu rayonner bien au-delà du territoire (Delory, 2023). L'argile, également abondante, a permis le développement de savoir-faire artisanaux et industriels, notamment pour la fabrication de briques, de tuiles et de poteries (Kaise, 2002). Tandis que le sable, issu des gisements alluviaux ou des couches sédimentaires, était utilisé à la fois dans la construction et dans l'industrie verrière, comme le note Toussaint (1975). D'autres ressources, bien que plus ponctuelles, viennent compléter cette richesse géologique : la barytine, exploitée comme charge minérale dans certaines applications industrielles, les anciens puits de charbonnage qui ont alimenté les activités industrielles situées le long de la Sambre, ou encore les schistes ardoisiers, dont l'exploitation a fourni des matériaux de couverture et de maçonnerie.

Ces derniers confèrent encore aujourd'hui une identité architecturale singulière à plusieurs villages du bassin, illustrant la forte relation entre ressource, technique constructive et paysage (*figure 20*). Ainsi, la richesse du sous-sol ne réside pas uniquement dans l'abondance des matériaux, mais aussi dans la diversité des usages qu'ils ont permis, contribuant à structurer durablement le territoire, tant dans son développement économique que dans sa morphologie bâtie.



Figure 20. Construction ancienne à partir de ressources locales. Crédit : Daniel Djike (2025)



Sites d'extraction

- Carrières
Bioversité wallonne
- ✕ Anciens sites de charbonnage
Géoportail

Types de sous-sols

- Sables bruxelliens
Géoportail_Carte des géologiques
- Argiles (Alluvions modernes)
Géoportail_Carte des géologiques
- Schistes ardoisiers (F. de Tribotte)
Géoportail_Carte des géologiques
- Calcaires (Membre d'Alvaux)
Géoportail_Carte des géologiques
- Marbres noirs (Membre de Golzinne)
Géoportail_Carte des géologiques
- Petit Granit (F. d'Ecaussinnes)
Géoportail_Carte des géologiques
- Dolomies (F. de Namur)
Géoportail_Carte des géologiques
- Calcaires (F. d'Onoz)
Géoportail_Carte des géologiques
- Calcaires (F. de Lives)
Géoportail_Carte des géologiques
- Barytine (F. du Hainaut)
Géoportail_Carte des géologiques

Figure 21. Diversité des ressources extraite du sous-sol. Crédit : Groupe projet (2025)

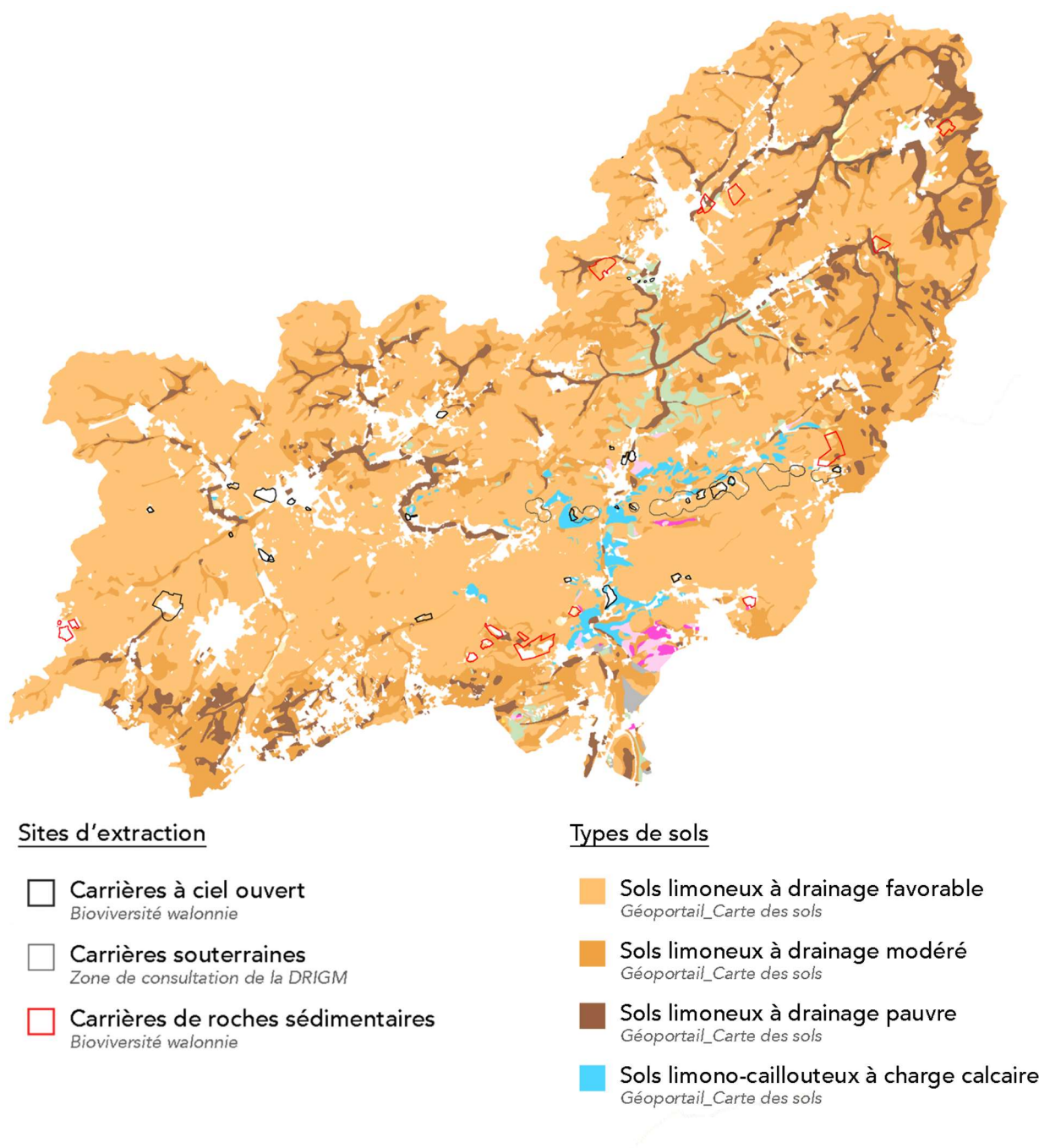


Figure 22. Diversité des ressources extraite du sol. Crédit : Groupe projet (2025)

4.2. Formes d'exploitation et transformation du paysage

a) L'exploitation superficielle à ciel ouvert :

L'analyse cartographique du sous bassin versant de l'Orneau révèle une forte imbrication entre les caractéristiques géologiques locales et les formes d'occupation du territoire (Delcambre & Pingot, 2002). Parmi les typologies d'extraction recensées, l'exploitation superficielle à ciel ouvert occupe une place importante, tant par sa répartition géographique, principalement dans la partie nord et sud du territoire, que par son rôle dans l'histoire socio-économique locale. Ce type d'extraction concerne essentiellement les matériaux meubles tels que les sables (*figure 23*), les argiles, les graviers et certains schistes tendres (*figure 24*), présents à faible profondeur, souvent entre un et dix mètres. Ces formations sédimentaires peu cohésives, particulièrement accessibles, ont permis un mode d'exploitation relativement simple, fondé sur des techniques mécaniques légères, sans recours au forage-minage.

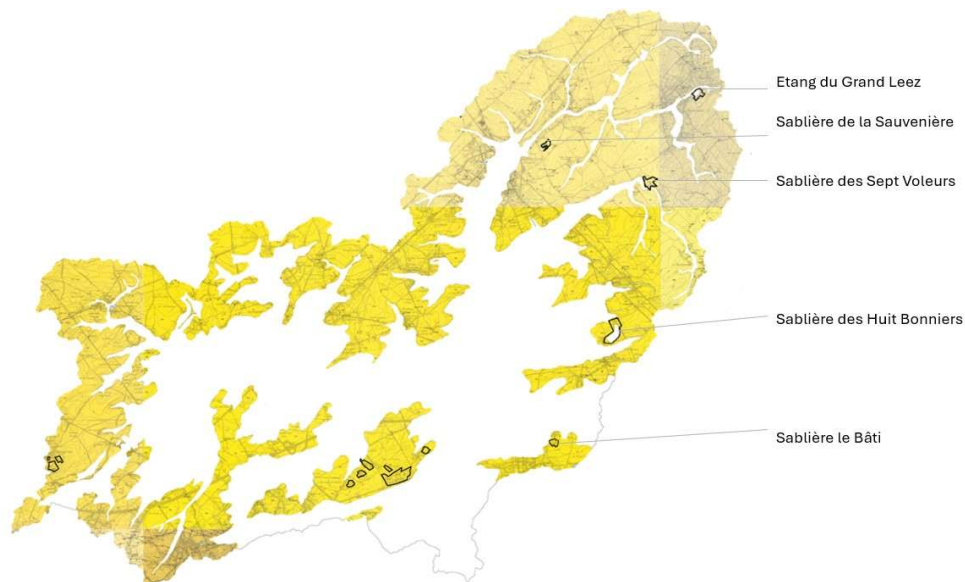


Figure 23. Site d'extraction superficielle à ciel ouvert de sable. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

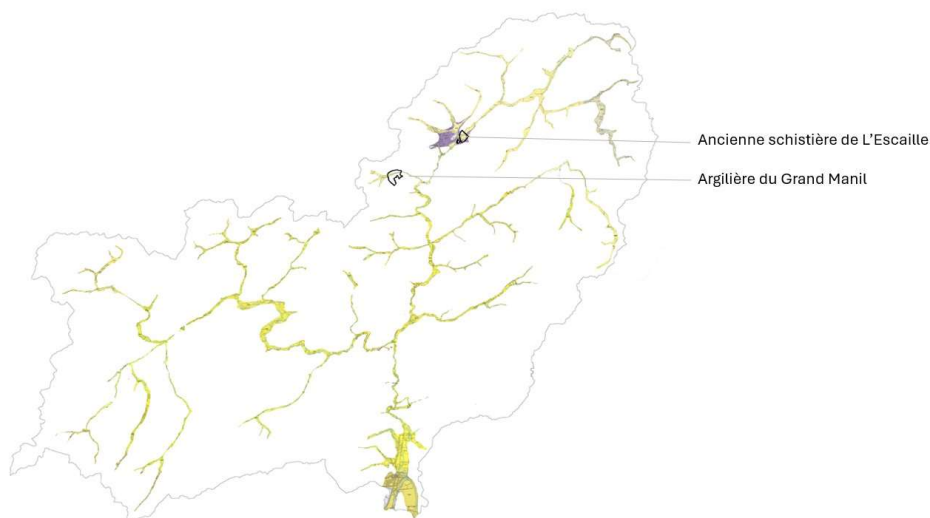


Figure 24. Site d'extraction superficielle à ciel ouvert d'argile et de schiste. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

Ces carrières ont façonné les paysages et les structures sociales du territoire. Leur accessibilité a favorisé le développement d'une économie de proximité : création d'emplois locaux, valorisation de savoir-faire techniques, et utilisation directe des matériaux pour la construction d'édifices (Gilles, 2018). À Gembloux, l'extraction du schiste ardoisier témoigne d'une telle dynamique. Le petit gisement situé au cœur de la commune a été exploité dès le XI^e siècle, et a fourni la pierre nécessaire à des constructions emblématiques du patrimoine local, telles que l'ancienne abbaye bénédictine, le beffroi ou encore la tour du château de Grand-Manil (Toussaint, 1975). Cette exploitation mobilisait non seulement les ressources du sous-sol, mais aussi une main-d'œuvre locale, inscrivant profondément la matière dans les pratiques sociales et les formes construites du territoire.

De la même manière, l'exploitation des sables a connu un essor significatif à partir des années 1840, avec le développement des glacières le long de la Sambre (Lima, 2011). Le sable local, utilisé dans le processus de fabrication du verre, a contribué à l'ancrage industriel de la région. Toutefois, dès les années 1860, l'introduction du procédé Solvay et la recherche d'un sable plus pur ont progressivement marginalisé l'exploitation locale au profit d'importations en provenance de la Flandre (Lima, 2011). L'activité s'est alors recentrée sur l'alimentation des chantiers de construction locaux, avant de décliner progressivement pour s'arrêter définitivement dans les années 1990 (Lima, 2011).

L'exploitation en surface, bien qu'intense à certaines périodes, a laissé peu de traces visibles aujourd'hui, si ce n'est quelques bosquets, des prairies humides ou même des étangs. La faible profondeur des gisements a permis une fermeture relativement simple des sites. Beaucoup d'entre eux ont été refermé par des phénomènes de sédimentation (*figure 25*), inondés en fonction des conditions hydrogéologiques (*figure 26*), notamment la proximité des nappes phréatiques ou encore remblayés (*figure 27*). Cette disparition progressive des stigmates de l'extraction témoigne d'une forme d'intégration paysagère post-exploitation, où l'environnement reprend lentement ses droits. Ainsi, le territoire garde en mémoire l'histoire d'un rapport étroit entre matière, savoir-faire, économie locale et transformation des milieux, une histoire discrète mais profondément inscrite dans la trame du paysage et des usages.



Figure 25. Ancienne sablière de la Sauvenière. Crédit : Gilles (2024)



Figure 26. Ancienne sablière du Grand Leez. Crédit : Inconnu (2024)



Figure 27. Ancienne argillère de Grand Manil . Crédit : TRADECOWALL (2023)

b) L'exploitation profonde à ciel ouvert :

Une seconde forme d'exploitation marquante dans le sous-bassin versant de l'Orneau concerne l'extraction à ciel ouvert de formations rocheuses compactes situées à des profondeurs plus importantes. Ce type d'exploitation s'observe principalement dans la partie centrale du territoire, où affleurent des bandes géologiques, composées de différentes variétés de roches calcaires (*figure 28*). Ces formations, bien plus consolidées que les sédiments, présentent des caractéristiques minéralogiques variées, influençant directement les modalités d'extraction. L'exploitation de ces roches profondes nécessite, dans un premier temps, la mobilisation de moyens techniques lourds afin d'évacuer les couches superficielles, avant d'atteindre le front de taille rocheux. L'extraction proprement dite s'effectue ensuite par sciage mécanique ou, plus fréquemment, par l'usage d'explosifs destinés à fragmenter la roche (Cummins, 2025).

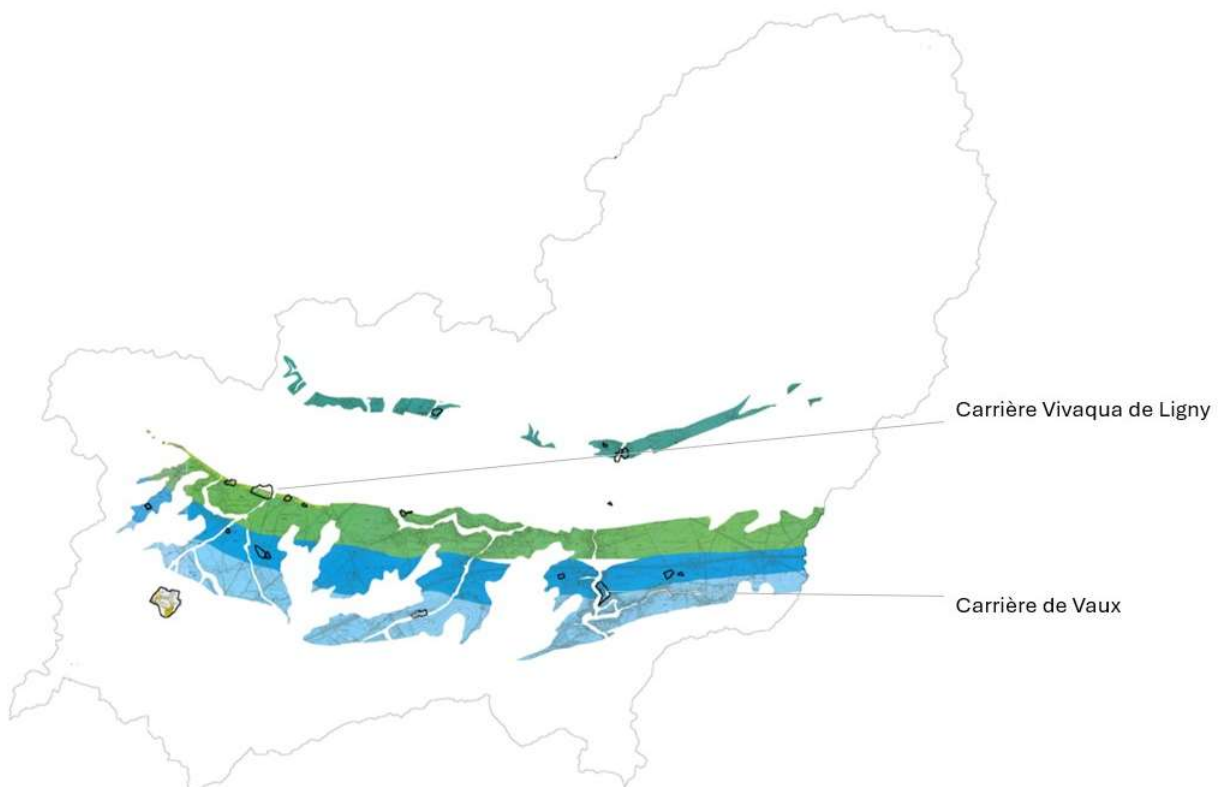


Figure 28. Site d'extraction Profonde à ciel ouvert de calcaire. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

Selon Toussaint (1975), ces roches calcaires étaient principalement exploitées pour la production de chaux, mais également pour la fabrication de moellons utilisés dans la construction de bâtiments villageois, y compris de plusieurs châteaux. Les châteaux de Balâtre, Mielmont et Falnuée constituent des exemples significatifs de l'usage local de cette ressource. Il convient de souligner que, dans la majorité des cas, l'exploitation de ces carrières n'avait pas de vocation commerciale. Elle répondait avant tout aux besoins constructifs des villages et des communautés environnantes, dans une logique d'économie territoriale où la matière première, les techniques de transformation et les savoir-faire étaient étroitement localisés.

La proximité spatiale entre les sites d'extraction et les fours à chaux, dont certains vestiges sont encore visibles à proximité d'anciennes carrières, renforce l'idée d'un système local intégré de valorisation de la matière (Durieux, 2015). La pierre calcaire, une fois extraite, était cuite pendant plusieurs jours afin d'obtenir de la chaux, un matériau polyvalent utilisé comme mortier, joint ou revêtement intérieur. Ce fonctionnement spatialement ramassé associant carrière, four et chantier a contribué à la création d'emplois, à la transmission d'un savoir-faire technique, et à l'édification d'un patrimoine bâti intimement lié aux ressources géologiques du territoire (Durieux, 2015).

Cependant, les caractéristiques physiques de ces carrières profondes ont laissé une empreinte durable dans le paysage. Certaines exploitations atteignaient des profondeurs avoisinant les 30 mètres, générant d'importants décaissements topographiques, notamment sur les versants (*figure 29*). Dans ces contextes, les processus de recolonisation végétale s'avèrent parfois limités, en raison de la compacité du substrat rocheux et de l'absence de sol apte à accueillir la biodiversité. D'autres carrières ont été reconverties en centres d'enfouissement de déchets, puis partiellement remblayées avec des matériaux plus fertiles, permettant à terme une couverture végétale. Lorsque l'exploitation atteignait la nappe phréatique, les cavités se retrouvaient inondées, formant des plans d'eau artificiels qui ont durablement modifié l'hydromorphologie locale (*figure 30*).

À l'instar des exploitations superficielles, les carrières profondes à ciel ouvert font généralement l'objet, après cessation d'activité, d'un abandon progressif. Les infrastructures techniques utilisées pour l'extraction ou la transformation de la matière sont laissées sur place, et les sites entrent dans une phase de reconquête naturelle ou de requalification paysagère, selon les dynamiques territoriales. Cette évolution post-extractive met en évidence des liens forts, parfois contradictoires, entre l'exploitation des ressources du sous-sol, le développement économique et social des territoires, et les changements durables dans leur environnement.



Figure 29. Ancienne carrière de calcaire de Vaux. Crédit : Daniel Djike (2025)



Figure 30. Ancienne carrière de petit granit de Ligny. Crédit : inconnu (2025)

c) L'exploitation profonde souterraine

Les exploitations souterraines observée dans le sous-bassin versant de l'Orneau concerne un gisement unique de roche calcaire à haute valeur minéralogique : le marbre noir de Mazy. Ce matériau, localisé à une profondeur d'environ 70 mètres et principalement dans la partie centrale du territoire, (*figure 31*) se distingue par son grain exceptionnellement fin et son homogénéité, le rendant particulièrement recherché à l'échelle internationale (Toussaint, 1975). En raison de sa profondeur et de ses caractéristiques physiques, son extraction ne peut se faire que par galeries souterraines, creusées au cœur de la formation rocheuse. Cette exploitation, qui perdure encore aujourd'hui bien que de manière très réduite, constitue la seule activité extractive encore en fonctionnement sur le territoire. Autrefois, elle a soutenu un véritable dynamisme local : elle a permis la création d'emplois spécialisés (tailleurs de pierre, ouvriers carriers), la construction d'ateliers, de fours à chaux, et même de logements ouvriers aujourd'hui en grande partie disparus. Des infrastructures telles que des voies de chemin de fer ont également été développées afin d'assurer l'acheminement du marbre vers les centres de transformation ou d'exportation, témoignant d'une structuration territoriale induite par la valeur économique de cette ressource (Toussaint, 1975).

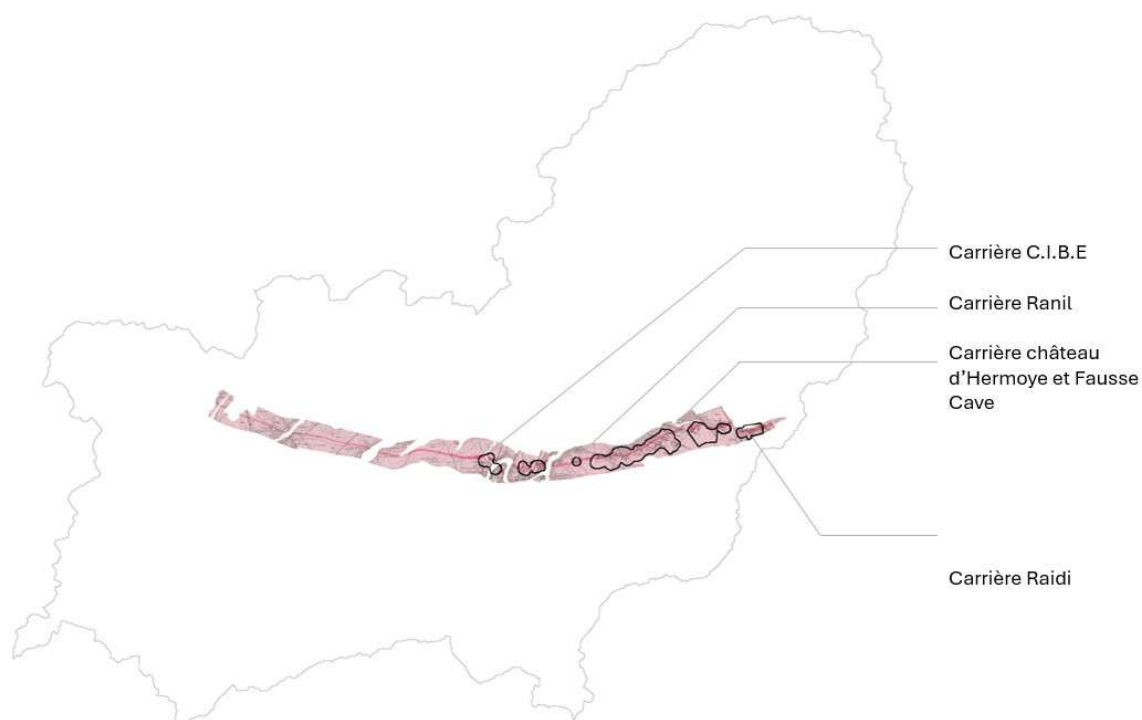


Figure 31. Site d'extraction Profonde souterraine. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

Cette exploitation n'a pas seulement modelé les dynamiques socio-économiques locales ; elle a aussi profondément affecté le sous-sol et les équilibres environnementaux. Les galeries abandonnées se sont progressivement remplies d'eau par ruissellement et infiltration, formant des poches d'eau souterraine parfois importantes (figure 33). Ces accumulations exercent une pression sur les vides laissés dans la roche, exposant le site à des risques d'affaissement du terrain (figure 32). En réponse à cette menace tout en valorisant cette ressource hydrique, des stations de pompage ont été installées afin de réguler le niveau de l'eau souterraine. Cette eau est aujourd'hui en partie réutilisée pour les besoins agricoles ou domestiques des communes voisines, illustrant la manière dont un ancien site extractif peut être intégré dans un nouveau cycle d'usages territoriaux (Delory, 2023). Ce rapport entre exploitation minière, sécurité géotechnique et ressource hydraulique souligne la complexité croissante des interactions entre sociétés et sous-sol.

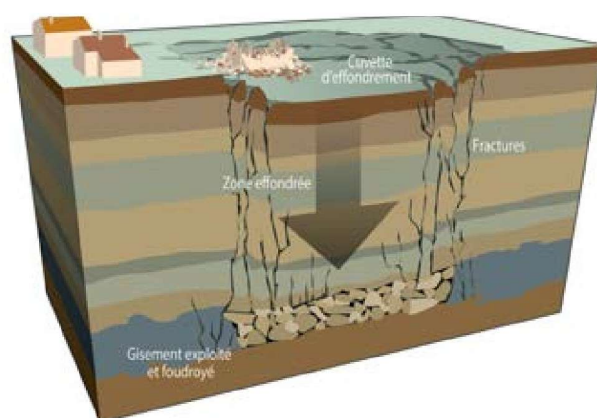


Figure 32. Phénomène d'affaissement progressif après exploitation souterraine. Crédit : Ineris (2023)



Figure 33. Carrière inondée. Crédit : Tchorski, (2020)

Bien que toujours en activité, l'exploitation du marbre noir ne répond aujourd'hui qu'à des commandes ponctuelles et de prestige. La chute drastique de la production témoigne d'un changement de régime économique, passant d'une dynamique industrielle soutenue à une activité résiduelle à forte valeur ajoutée, mais à faible intensité. Le site conserve néanmoins une mémoire matérielle forte, entre vestiges industriels et impacts géotechniques encore actifs (figure 34). Ainsi, cette exploitation souterraine, centrée sur une ressource rare, illustre avec force la manière dont une relation localisée à la matière peut structurer un territoire dans sa durée, aussi bien sur le plan économique et social qu'en termes d'aménagement et de transformation environnementale.

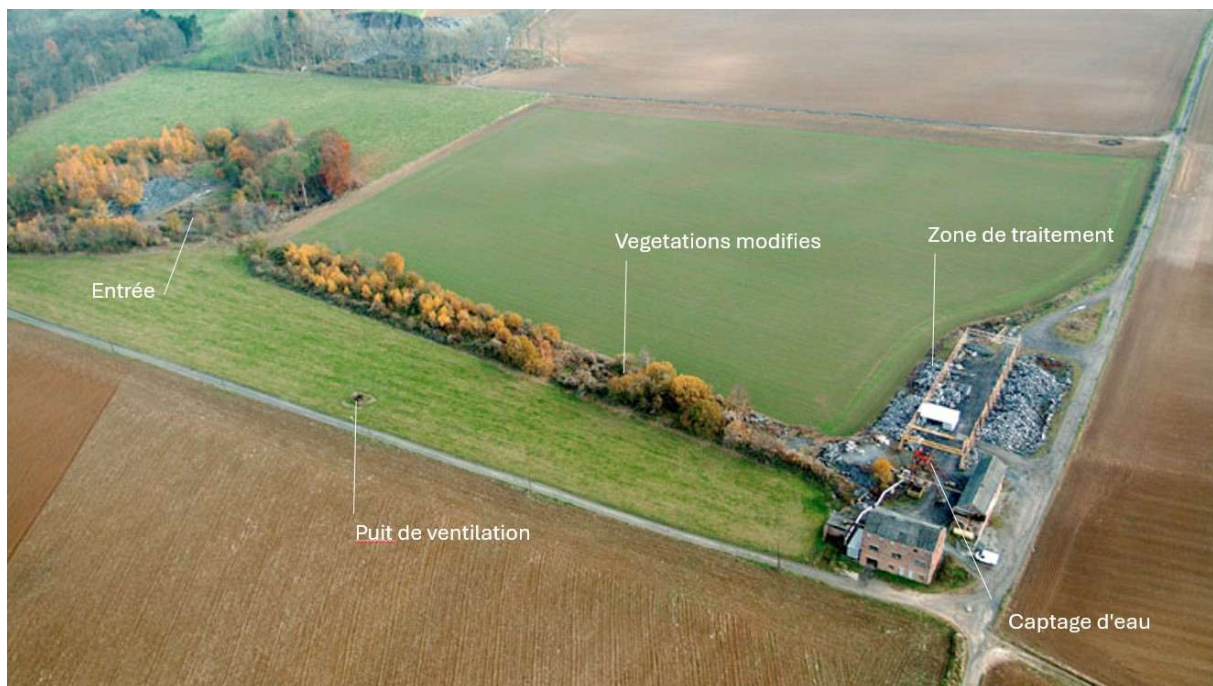


Figure 34. Carrière de Golzinne, encore en activité. Crédit : d'après Tchorski (2020), adaptée par Aliciance Paoli 2025)

4.3. Patrimoines oubliés et héritages fragmentés

Aujourd'hui, le sous-bassin versant de l'Orneau ne conserve qu'un seul site d'exploitation actif, celui du marbre noir de Mazy (Fediex, 2020). Pourtant, le territoire a connu, pendant plusieurs siècles, une activité extractive intense et diversifiée. Cette activité a façonné le paysage, l'économie et l'organisation sociale locale. Elle a aussi permis l'édification de nombreux bâtiments encore visibles aujourd'hui. Cependant, les traces matérielles de cette exploitation sont de plus en plus marginalisées. Les anciens sites de production (carrières, ateliers de taille, fours à chaux ou installations industrielles) sont pour la plupart abandonnés, enfouis sous la végétation ou rendus inaccessibles par le développement urbain et forestier. Voir figure 35, 36 et 37. Cette situation contribue à effacer de la mémoire collective une partie essentielle de l'histoire du territoire.



Figure 35. Ancien four à chaux près du château de Balâtre. Crédit : Georges Durieux (2015)



Figure 36. Ancien atelier de taille de marbre noir de Mazy. Crédit : Daniel Djike (2025)



Figure 37. Ancien Chemin de fer près de Golzinne. Crédit : Inconnu, Sd

Le contraste entre ces lieux de production délaissés et les bâtiments construits avec les matériaux extraits est particulièrement révélateur. De nombreux châteaux, fermes, églises ou ouvrages en pierre, construits grâce à la richesse du sous-sol local, sont aujourd'hui bien conservés, valorisés et inscrits dans des politiques patrimoniales. Ces édifices sont visibles, entretenus et souvent protégés. À l'inverse, les sites d'extraction et les infrastructures associées, qui ont pourtant permis leur réalisation, ne bénéficient d'aucune reconnaissance officielle (Durieux, 2015). Ce déséquilibre crée une lecture incomplète du patrimoine (*figure 38*) : l'histoire est racontée à travers les résultats visibles, mais les lieux du travail, de l'effort et du savoir-faire technique sont oubliés. Pourtant, ces lieux incarnent une mémoire sociale et matérielle importante : ils racontent les liens entre les sociétés locales et leur environnement, les pratiques artisanales, les modes de vie liés à l'exploitation du sous-sol et les dynamiques économiques passées (Durieux, 2015).

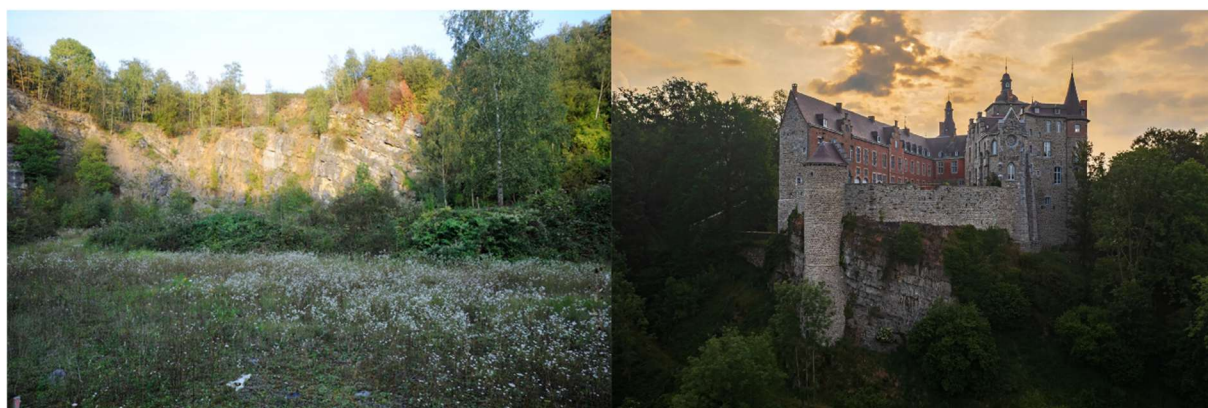


Figure 38. Ancienne carrière de Vaux ayant servi à la construction du Chateau de Mielmont au XIIe. Crédit : Daniel Dijke (2025)

Comme l'a observé le géologue Jean Leurquin, l'urbanisation récente renforce cette invisibilisation en recouvrant ou en isolant les anciens sites extractifs. Si rien n'est entrepris pour les documenter ou les préserver, il deviendra à terme impossible d'y mener des recherches géologiques, historiques ou pédagogiques (Giot & Leurquin, 2013). Cela représente un risque important de perte de connaissance, non seulement sur les matériaux utilisés, mais aussi sur les formes d'organisation du territoire à travers le temps. L'effacement progressif de ces sites réduit la mémoire patrimoniale à ses seules expressions monumentales, alors que le patrimoine technique, artisanal et paysager mérite également d'être reconnu. L'histoire du territoire ne peut être comprise pleinement qu'en replaçant les lieux d'extraction au cœur du récit, en tant qu'espaces de transformation du paysage, de création de richesse, et de construction d'une identité locale (Giot & Leurquin, 2013).

En somme, l'ensemble des activités extractives qui se sont succédé sur le sous-bassin versant de l'Orneau a profondément marqué le territoire, laissant derrière elles de nombreuses traces, pour la plupart invisibles et enfouies. Si ces vestiges sont rarement identifiables au premier regard, une lecture attentive du paysage, croisée avec des sources historiques et des enquêtes

de terrain, permet de révéler l'existence d'un patrimoine géologique et industriel encore présent. Carrières abandonnées, fours à chaux en ruine, galeries souterraines, voies ferrées désaffectées ou plateformes de stockage oubliées dessinent les contours d'un territoire travaillé en profondeur (*figure 39*). Ces éléments, bien que parfois dissimulés par la végétation ou rendus inaccessibles, témoignent de l'intensité et de la diversité des exploitations passées. Leur repérage demande des efforts d'investigation non négligeables, mais leur présence constitue une mémoire matérielle précieuse, capable d'éclairer les rapports historiques entre les sociétés locales et leur sous-sol.

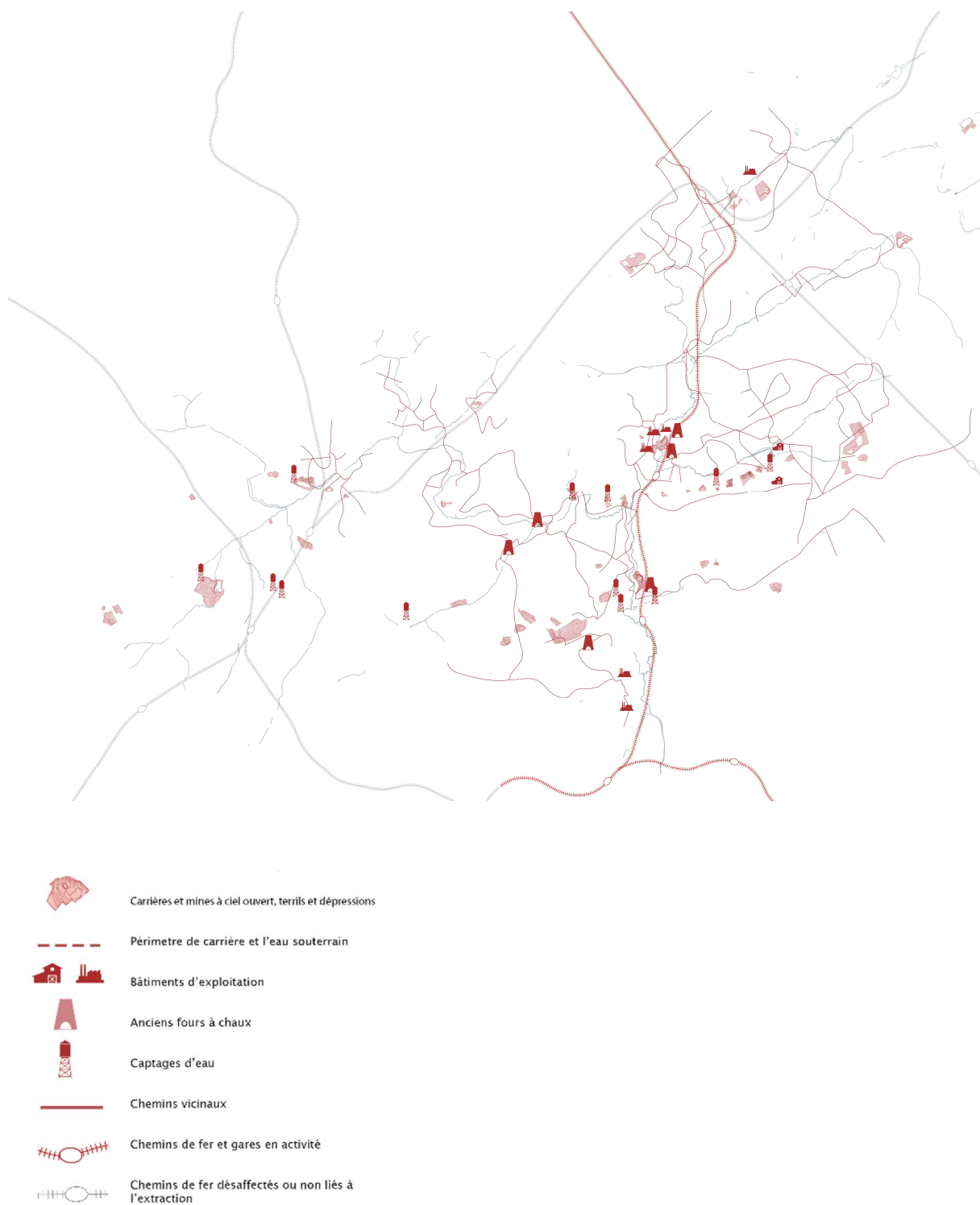


Figure 39. Traces résultantes de l'activité extractive. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

5. Enjeux territoriaux

5.1. Enjeux hydriques

Le sous-bassin versant de l'Orneau présente des signes de vulnérabilité hydrique, qui semblent s'accroître dans un contexte de changement climatique qui engendre d'autres enjeux. Les observations réalisées à l'échelle régionale indiquent une alternance plus marquée entre périodes de sécheresse et épisodes de fortes précipitations (Service public de Wallonie, 2025). Bien que les données spécifiques à ce sous-bassin soient encore limitées, plusieurs événements récents illustrent cette tendance. Parmi eux, les inondations de juillet 2021 constituent un cas emblématique. Des pluies exceptionnellement intenses ont provoqué un ruissellement rapide sur les versants, entraînant des débordements localisés. Le château / Golf de Falnuée (*figure 40*), situé à proximité immédiate de l'Orneau, a été particulièrement touché (Jottrand, 2025). Ces événements soulignent les limites de la gestion actuelle des eaux de surface, particulièrement dans un contexte topographique contraignant et partiellement urbanisé.



Figure 40. Terrain de golf du château de Falnuée inondé par l'Orneau en juillet 2021. Crédit : Éric Jottrand (2021)

Si cet épisode reste ponctuel dans sa manifestation, il s'inscrit néanmoins dans un contexte hydrologique plus large, décrit par les diagnostics du Contrat de Rivière Sambre & Affluents (CRSA). Ceux-ci mettent en évidence deux problématiques récurrentes : des sécheresses ponctuelles associées à la baisse temporaire des nappes phréatiques, et des ruissellements importants lors de pluies intenses. Ces constats, établis à partir d'observations régionales, ne fournissent toutefois pas de séries chronologiques spécifiques à l'Orneau permettant d'évaluer avec précision l'évolution de ces phénomènes dans le temps. Face à ces éléments, plusieurs acteurs, tels qu'Interreg DIADeM (2023), recommandent de renforcer la gestion de l'eau à l'échelle locale. Les solutions préconisées incluent la récupération et l'infiltration des eaux pluviales, ainsi qu'une adaptation des pratiques agricoles et urbaines. Bien que ces recommandations ne soient pas exclusivement fondées sur des données propres au sous-bassin de l'Orneau, elles s'inscrivent dans une logique de prévention des risques et de résilience face à des conditions météorologiques potentiellement plus extrêmes. (Projet Interreg DIADeM, 2023).

Face à ces enjeux, la recherche de solutions ne se limite pas aux dispositifs techniques récents ou aux changements de pratiques agricoles et urbaines. Elle peut aussi s'appuyer sur des éléments déjà présents dans le paysage et hérités de l'histoire locale. Le réseau hydrographique dense du territoire croise en effet de nombreux anciens sites d'extraction aujourd'hui désaffectés. L'analyse cartographique met en évidence une relation étroite entre ces vides créés par l'homme et les mouvements de l'eau dans la région (*figure 41*). Certains de ces sites se sont transformés en zones humides ou en bassins de rétention, jouant un rôle tampon lors des crues et contribuant ponctuellement à la régulation thermique locale. Ces espaces, issus de l'exploitation du sous-sol, participent désormais à la gestion hydrique du territoire, de manière passive mais significative. Leur intégration dans des stratégies territoriales de résilience pourrait constituer un levier concret pour renforcer la réponse aux déséquilibres croissants du cycle de l'eau.

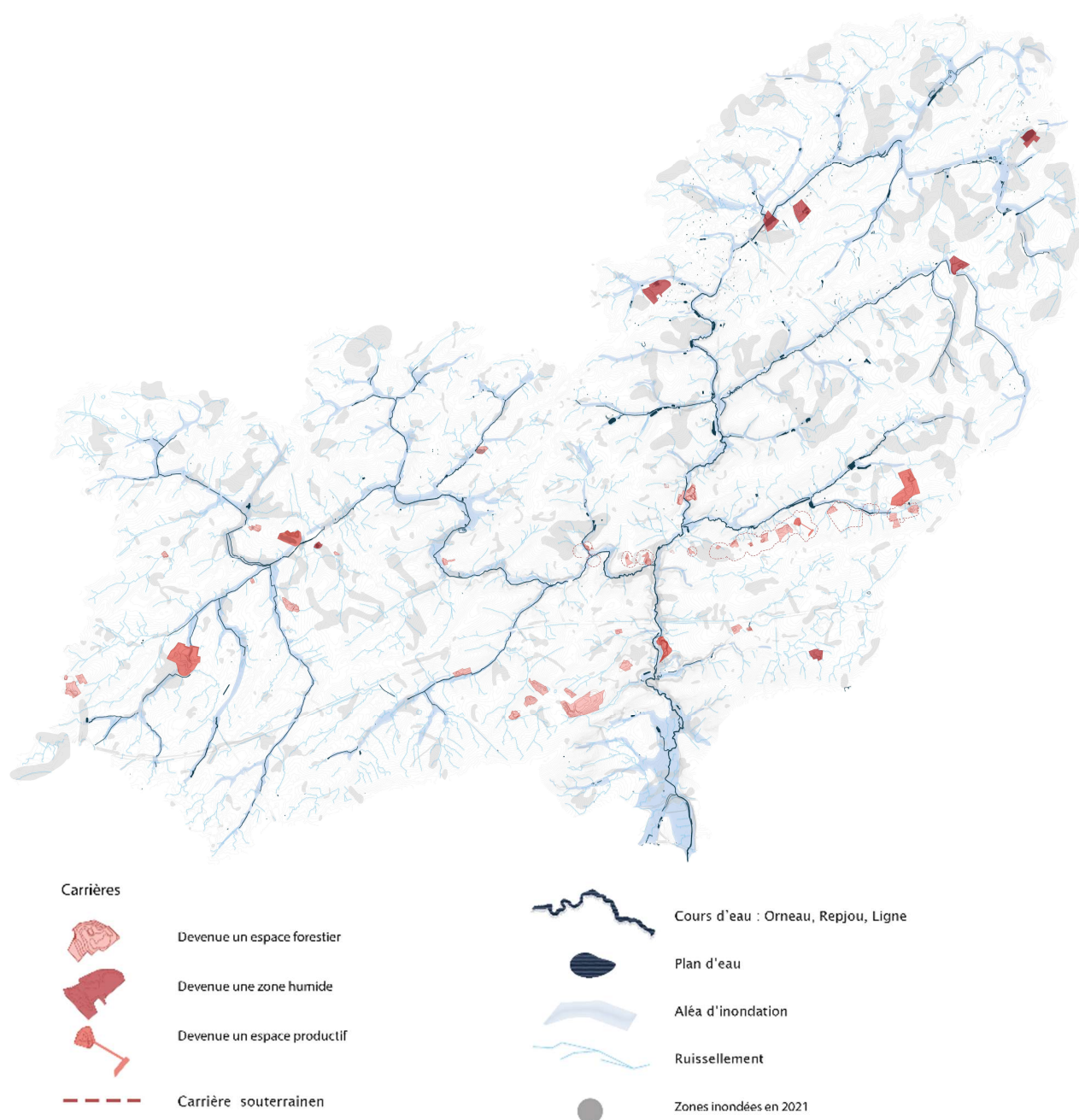


Figure 41. Potentiels d'interaction entre les carrières et les enjeux hydriques. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

5.2. Fragmentation écologique et biodiversité

La fragmentation des milieux naturels constitue un enjeu écologique majeur dans le sous-bassin versant de l'Orneau, résultant d'une évolution progressive des usages du sol. L'intensification agricole, la disparition des haies, mares et zones humides, ainsi que l'urbanisation diffuse, ont rompu la continuité écologique indispensable à la survie de nombreuses espèces dont les cycles biologiques requièrent des habitats connectés (Taymans et al., 2006). Ce phénomène impacte particulièrement les amphibiens, reptiles et certains insectes, fragilisant la biodiversité locale.

Cette dynamique est largement documentée dans les plans communaux, notamment le Plan Communal de Développement de la Nature (PCDN) de Gembloux, qui alerte sur le déclin d'espèces rares, la perte de connectivité entre habitats, et la progression d'espèces exotiques envahissantes favorisées par la dégradation des milieux naturels. À l'échelle locale, la réserve naturelle des Trois Viviers à Sombreffe illustre bien ces impacts : le remembrement agricole a entraîné la disparition d'une mosaïque de milieux humides, aujourd'hui partiellement restaurés (Natagora, 2024). Au-delà du territoire de l'Orneau, un diagnostic réalisé sur le bassin de la Sambre par la Région wallonne confirme la gravité de cette fragmentation à une échelle plus large. Ce rapport souligne le morcellement des habitats, la faible continuité écologique entre espaces naturels, ainsi que la sous-valorisation écologique de certains secteurs urbains, obstacles qui compromettent la préservation durable de la biodiversité (Tvbuonair, 2018). Même si ces constats sont formulés à une échelle régionale, ils fournissent un contexte pertinent pour mieux comprendre les défis auxquels le sous-bassin de l'Orneau est confronté.

Dans ce contexte préoccupant, les anciens sites d'extraction apparaissent comme des espaces au potentiel écologique souvent méconnu. Leur configuration topographique, fréquemment en dépression ou en contact avec des zones humides, offre des conditions favorables à la recolonisation par diverses espèces. Ainsi, malgré leur passé associé à une altération paysagère, ces espaces peuvent jouer un rôle complémentaire dans le renforcement du maillage écologique local (*figure 42*). Leur intégration réfléchie dans des stratégies territoriales concertées pourrait non seulement atténuer les effets négatifs de la fragmentation, mais aussi améliorer la connectivité des habitats, contribuant ainsi à une meilleure résilience de la biodiversité sur le territoire (*figure 43*) (Natagora, 2024).



Figure 42. AVANT/ APRES de l'ancienne argilière de Grand-Manil. Crédit : TRADECOWALL (2023)

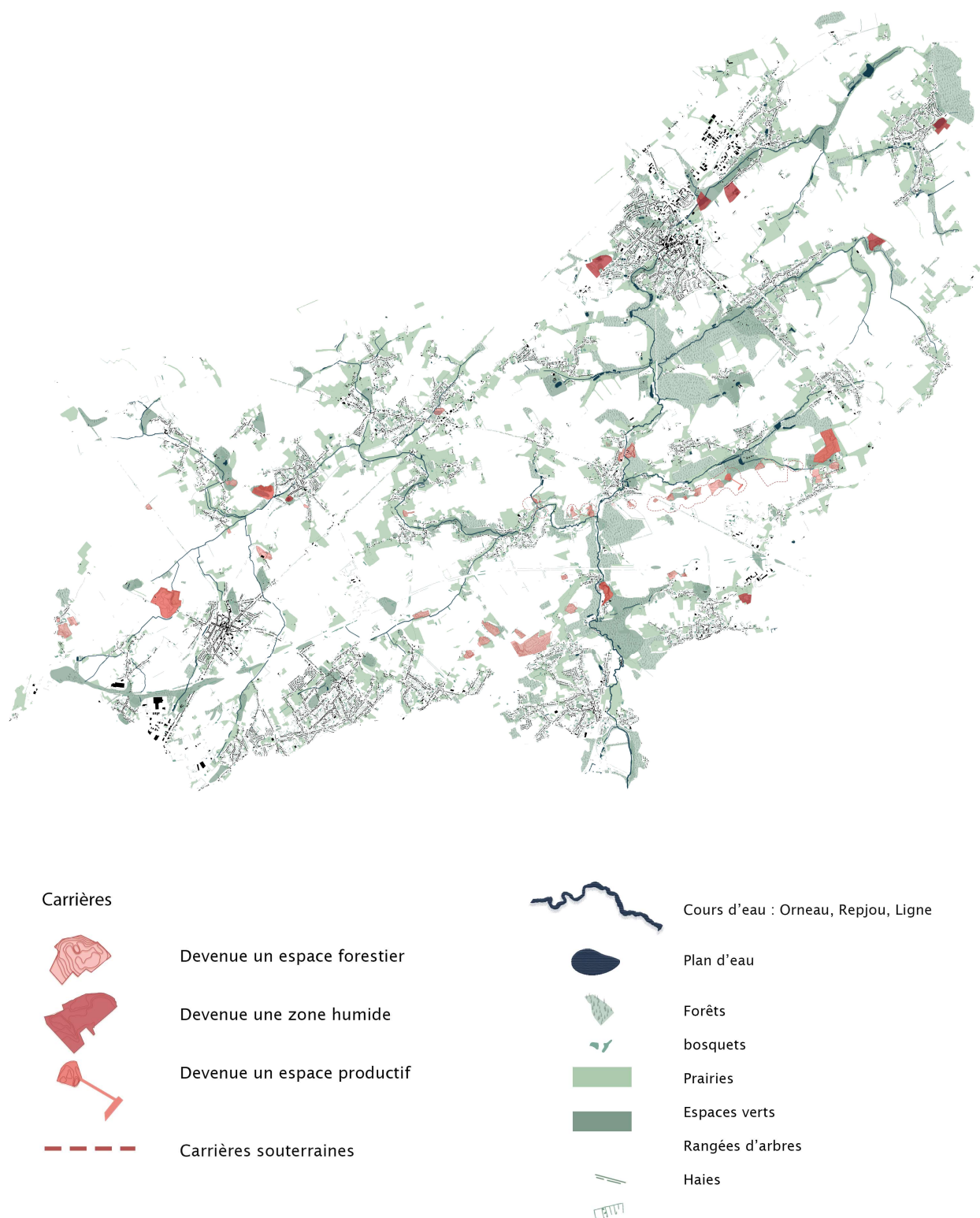


Figure 43. Potentiels d'interaction entre les carrières et la biodiversité fragmentée. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

5.3. Croissance démographique et besoins en matériaux

La croissance démographique prévue dans le sous-bassin versant de l'Orneau exerce une pression importante sur les dynamiques territoriales et sur les ressources locales. Selon les projections de l'Institut Wallon de l'Évaluation, de la Prospective et de la Statistique (IWEPS, 2024). Les communes du territoire (*figure 45*), devraient connaître d'ici 2050 des augmentations significatives, bien que variables, de leur population. Gembloux, par exemple, pourrait voir sa population croître d'environ 60 %, tandis que Sombreffe, Jemeppe-sur-Sambre, Sambreville et Fleurus enregistreraient des hausses allant de 3 % à 30 % (*figure 44*). Ces évolutions indiquent une demande accrue en logements et infrastructures, ce qui se traduit directement par un besoin plus important en matériaux de construction. Cette hausse démographique pourrait donc conduire à une extension urbaine classique, reposant sur l'exploitation plus intensive des ressources minérales. Cela signifierait l'ouverture de nouveaux sites d'extraction ou la poursuite de l'exploitation des carrières existantes, en Belgique ou à l'étranger. Un tel modèle, déjà largement en place aujourd'hui, suscite des préoccupations croissantes en raison de ses impacts négatifs sur l'environnement, le paysage et les populations locales (IWEPS, 2024).

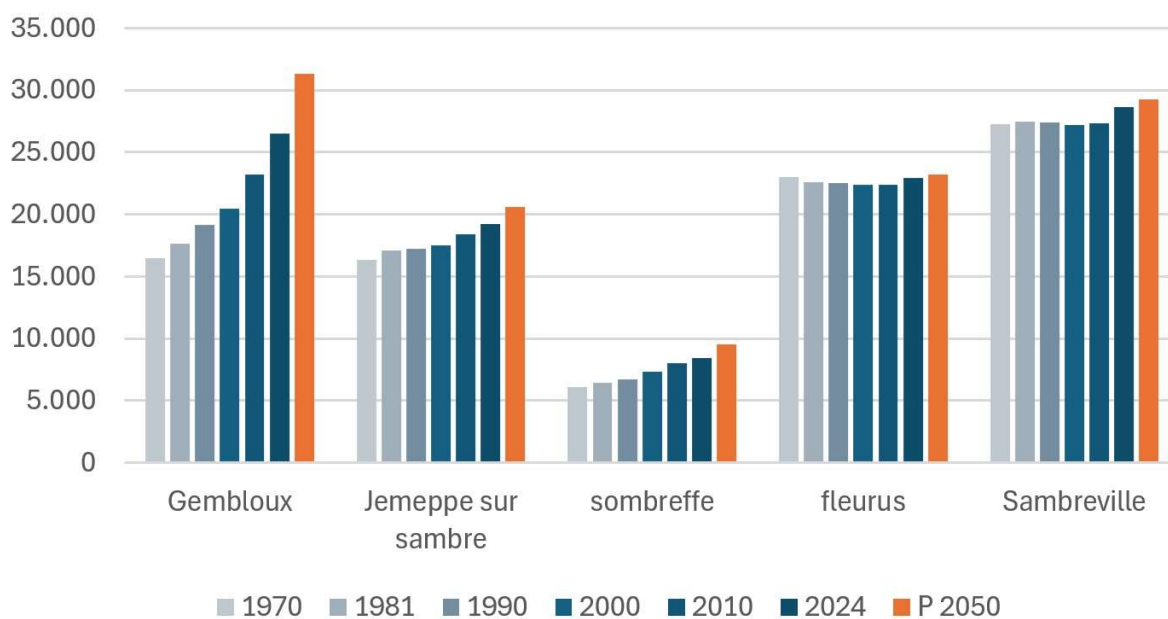


Figure 44. Croissance démographique par commune. Crédit : d'après Statbel (2024), adaptée par Daniel Djike (2025)



Figure 45. Division administrative des communes du sous-bassin versant de l'Orneau. Crédit : d'après IWEPS sd, adaptée par Daniel Djike (2025)

Cependant, la demande liée à cette croissance ne se limite pas à la construction neuve. Une analyse locale des permis de construire montre une augmentation notable des demandes de rénovation, d'extension ou de transformation des bâtiments existants (*figure 46*), ainsi qu'un intérêt grandissant pour des formes d'habitat léger (Statbel, 2024) (2^e échevine JEM, 2025). Cette tendance témoigne d'une volonté, parfois encouragée par les acteurs locaux, de valoriser le patrimoine bâti et de limiter l'étalement urbain. En privilégiant la rénovation, le territoire pourrait diminuer sa dépendance aux matériaux neufs et favoriser des pratiques plus durables, telles que le réemploi de matériaux, le recyclage, ainsi que l'utilisation de matériaux biosourcés et géosourcés. Ces démarches s'inscrivent dans une logique de sobriété constructive, qui cherche à réduire l'impact environnemental du secteur du bâtiment.

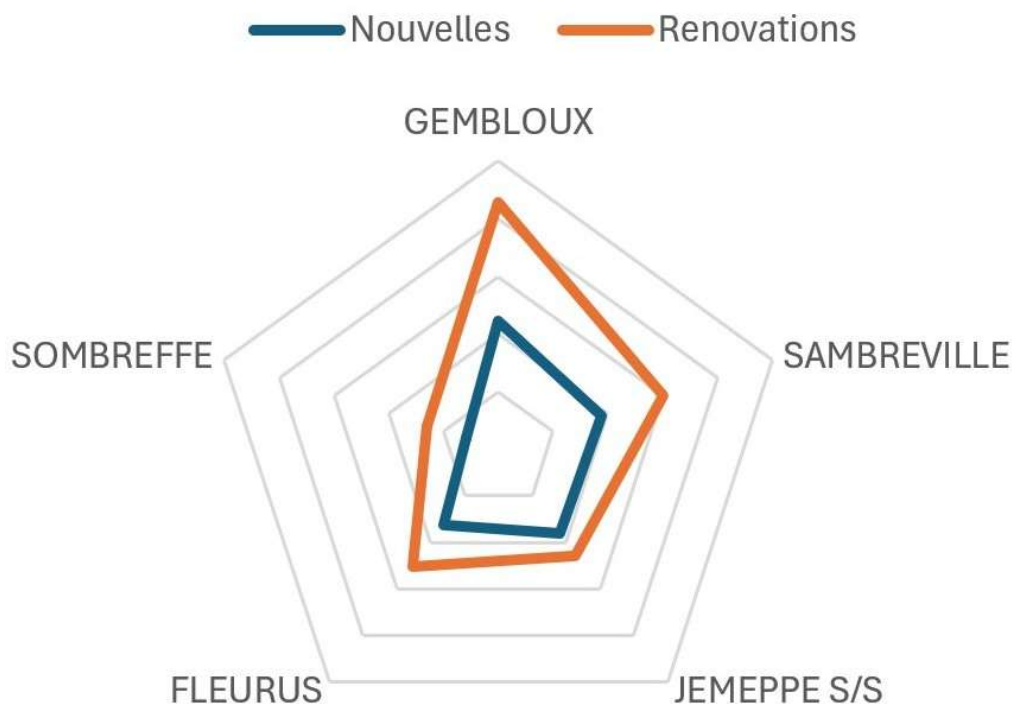


Figure 46. Comparaison des permis délivrés pour constructions neuves et rénovations selon les communes. Crédit : d'après Statbel (2024), adaptée par Daniel Djike (2025)

Ainsi, bien que la croissance démographique représente une pression incontestable sur le territoire, elle engendre des réponses contrastées. D'un côté, elle renforce les dynamiques extractives traditionnelles, susceptibles d'aggraver les impacts environnementaux. De l'autre, elle ouvre la voie à des alternatives plus durables qui valorisent le bâti existant et encouragent des modes de construction respectueux des ressources.

Ces observations soulignent l'importance d'une gouvernance territoriale proactive, capable de guider ces évolutions vers un développement harmonieux et durable. En intégrant ces dimensions dans les politiques locales, il serait possible de concilier les besoins croissants en logements avec la préservation des ressources naturelles et la réduction des impacts environnementaux.

5.4. Superposition des enjeux

Le territoire du sous-bassin versant de l'Orneau est marqué par un héritage historique important lié aux activités extractives. Autant de traces qui témoignent d'une exploitation passée intense. Au fil du temps, ces sites ont été naturellement recolonisés par la végétation, formant parfois des zones humides temporaires ou des bassins de rétention. Ils jouent désormais un rôle écologique non négligeable en servant de réservoirs de biodiversité et en contribuant à l'équilibre hydrologique du territoire, comme présenté précédemment. Ces fonctions écologiques sont précieuses, mais elles résultent d'un processus spontané, non planifié, ce qui limite leur potentiel dans une gestion territoriale cohérente.

Par ailleurs, ce même territoire est confronté à plusieurs enjeux majeurs déjà identifiés dans les analyses précédentes : la gestion du ruissellement et des crues, la fragmentation écologique qui fragilise la biodiversité, ainsi que la croissance démographique qui accentue la pression sur les ressources naturelles. Face à ce contexte, une question centrale se pose : comment répondre aux besoins croissants en matériaux de construction tout en renforçant et non pas seulement en préservant les fonctions écologiques et sociales du territoire ?

Une piste de réponse réside dans une exploitation locale raisonnée, capable de réduire l'empreinte environnementale liée au transport des matériaux et à l'ouverture de nouveaux sites souvent éloignés, tout en intégrant dès la conception du projet une réflexion sur l'après-extraction. Cette planification permettrait de transformer la carrière en un véritable atout environnemental, par la création ou la restauration d'habitats naturels favorisant la biodiversité et le renforcement de la trame verte, mais aussi en un atout social, grâce à l'aménagement d'espaces récréatifs, pédagogiques ou culturels, renforçant le lien entre les habitants et leur territoire. Dans cette perspective, le sous-bassin versant de l'Orneau, marqué par un riche héritage extractif et doté de ressources géologiques variées encore disponibles, présente un fort potentiel pour expérimenter ce type d'approche intégrée.



Figure 47. Localisation du territoire d'étude. Crédit : Daniel Djike (2025)

Cependant, le site situé entre Saint-Amand (commune de Fleurus) et Ligny (commune de Sombreffe) se distingue particulièrement (*figure 47*). Ce territoire concentre de nombreux paramètres favorables : diversité et richesse géologique, proximité des centres urbains, et une mémoire paysagère et extractive forte. Plutôt que de considérer ces espaces comme des vestiges à laisser à l'abandon, il s'agit d'intégrer leur histoire dans une dynamique territoriale contemporaine. L'ambition est alors double : d'une part, pratiquer une nouvelle extraction locale et maîtrisée, répondant aux besoins actuels de construction durable, et d'autre part, préparer l'avenir de ces espaces en les transformant en leviers de résilience territoriale. Le projet vise à concevoir des carrières intégrées, multifonctionnelles, combinant extraction, gestion environnementale et dynamique sociale. Ce modèle extractif permettrait de valoriser les ressources locales tout en minimisant les impacts négatifs classiques de l'extraction. Il pourrait aussi soutenir le renouveau des savoir-faire artisanaux et renforcer l'ancrage territorial de la construction, en lien étroit avec les enjeux de sobriété matérielle et de proximité.

Afin de prolonger et d'approfondir cette réflexion, la suite de l'étude développera deux scénarios d'aménagement visant à explorer de nouvelles méthodes d'extraction et de gestion des ressources sur le territoire de l'Orneau. Cette démarche repose sur un changement volontaire d'échelle d'observation. L'analyse à l'échelle globale du territoire (*figure 48*) permettra d'appréhender les grandes dynamiques spatiales, environnementales et socio-économiques qui structurent la région et conditionnent son évolution. Toutefois, cette vision d'ensemble, bien que nécessaire, demeure insuffisante pour concevoir des solutions pleinement adaptées aux réalités du terrain. C'est pourquoi il sera essentiel d'opérer des allers-retours constants entre cette lecture macro et une observation à plus fine résolution, celle des sites spécifiques et des contextes locaux. Ce travail à petite échelle mettra en évidence les particularités propres à chaque lieu : nature précise des formations géologiques, usages existants, contraintes techniques ou environnementales, relations entre les habitants et leur cadre de vie. Ces informations, souvent invisibles à l'échelle globale, sont déterminantes pour orienter les choix et calibrer les interventions. Ainsi, le croisement des échelles offre un double regard, à la fois global et intime, indispensable pour formuler des stratégies d'aménagement ambitieuses mais solidement ancrées dans le contexte local. Il permet aussi de renforcer l'enquête de terrain en intégrant des nuances, des micro-situations et des variations locales qui, cumulées, influencent directement la faisabilité, l'intégration et la durabilité du projet.

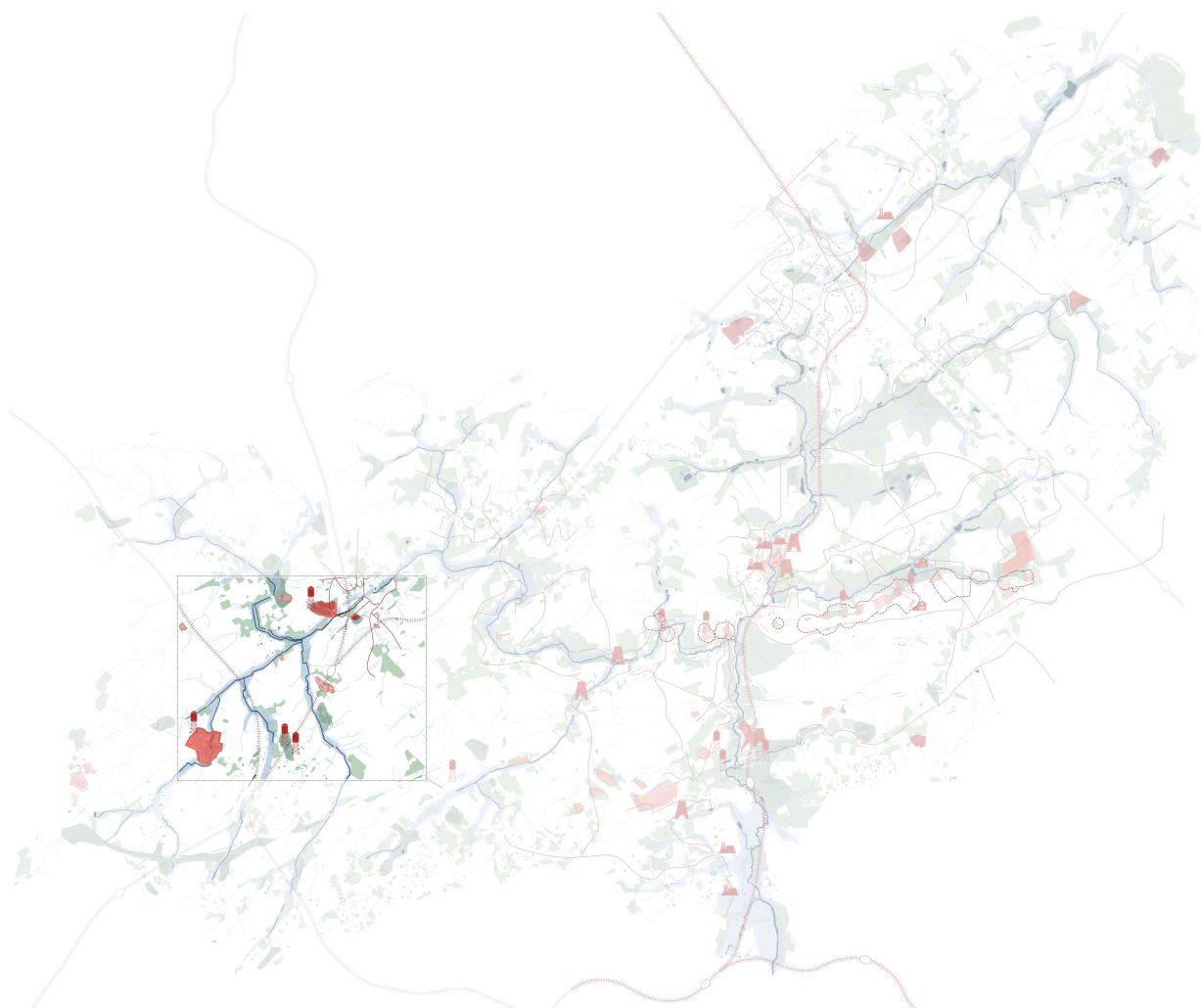


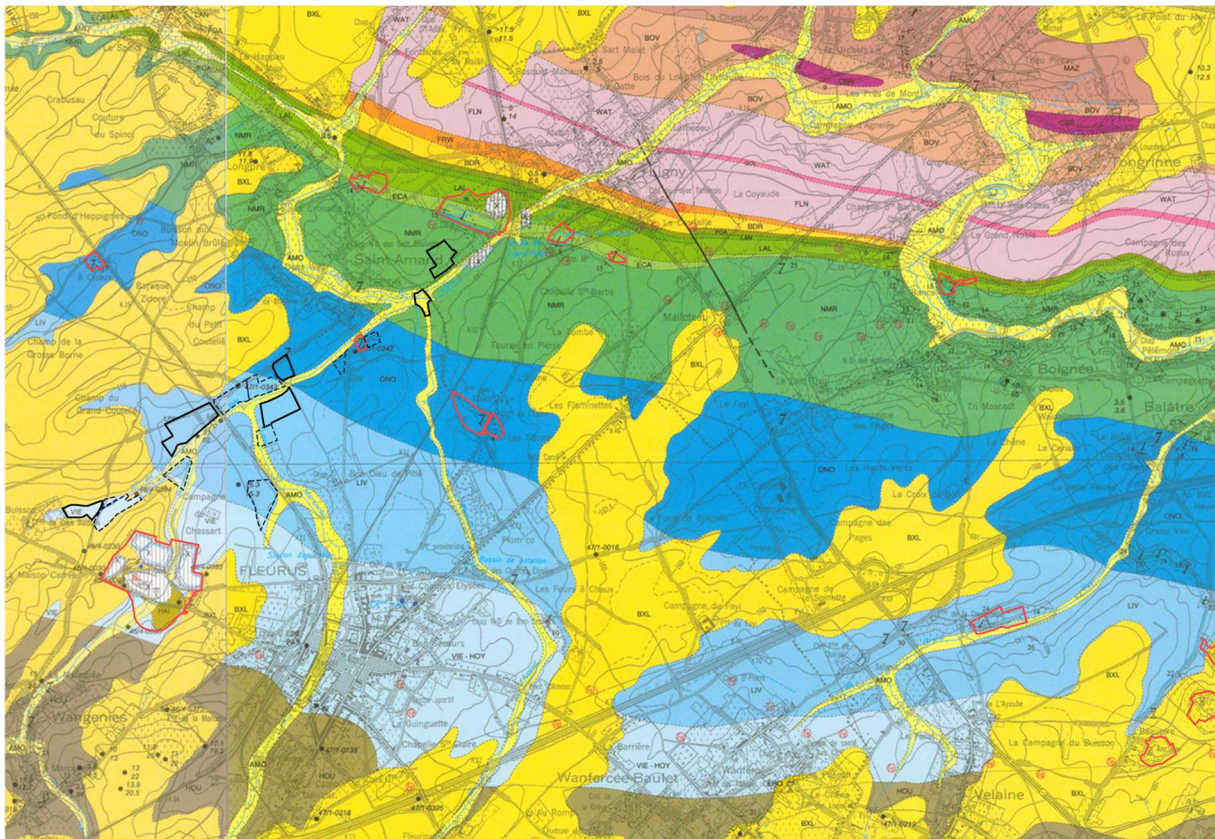
Figure 48. Zone d'intervention. Crédit : Daniel Djike (2025)

6. Scénarios d'extraction régénérative

Avant de présenter les différents scénarios d'extraction, il est important de rappeler que leur élaboration s'appuie directement sur les analyses développées dans les chapitres précédents. Les descriptions détaillées du territoire, qu'il s'agisse de sa structure géologique, de ses dynamiques paysagères, de ses enjeux environnementaux et climatiques, de ses usages actuels ou de l'héritage des anciennes activités extractives, constituent une base indispensable à la réflexion. C'est en s'appuyant sur cette lecture approfondie et multiscalaire du sous-bassin versant de l'Orneau que peuvent émerger des hypothèses d'action et de transformation adaptées, cohérentes et pertinentes face aux enjeux contemporains.

6.1. Scénario 1: l'extraction comme outil d'aménagement du territoire

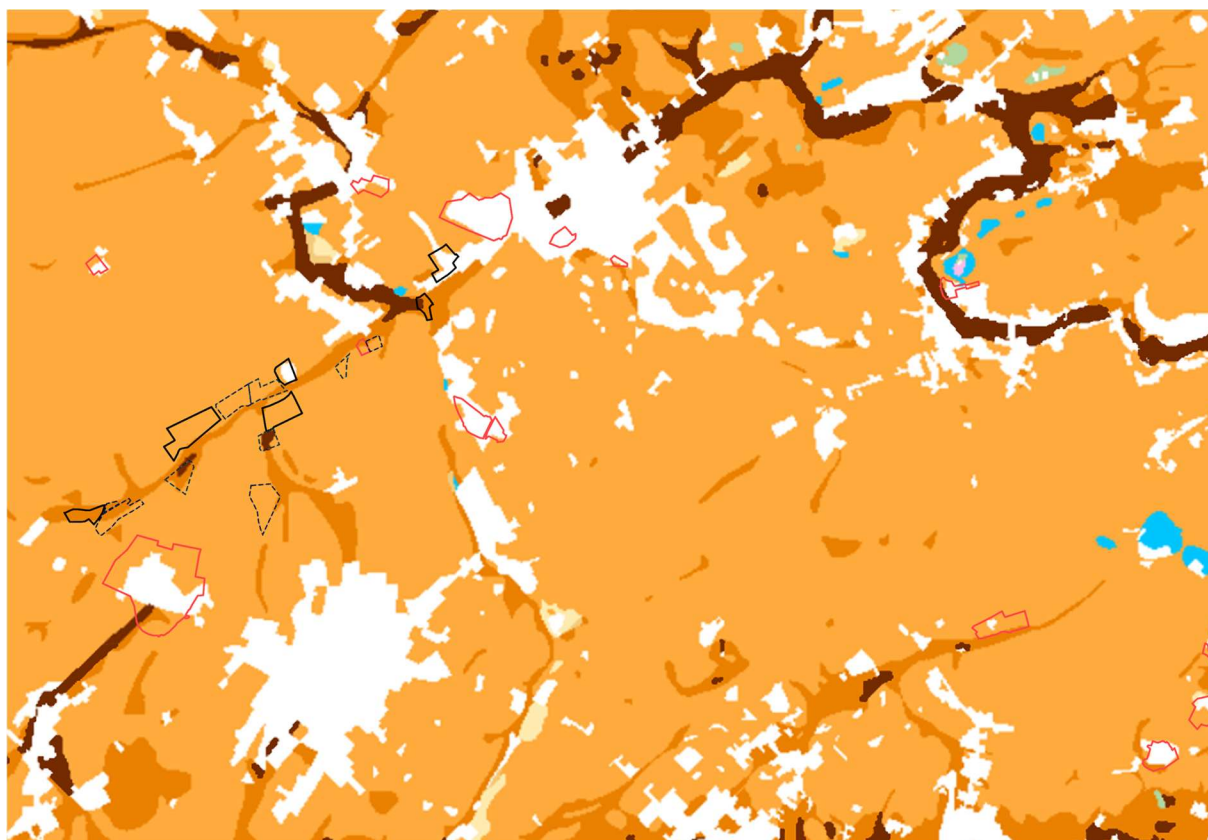
Le village de Ligny, situé dans la commune de Sombrefte, constitue un territoire particulièrement intéressant, tant par son contexte géologique que par son héritage historique. Le sous-sol y est traversé par une grande diversité de formations, qui témoignent à la fois de la complexité et de la richesse géologique de la région. Parmi elles, les formations calcaires occupent une place prépondérante : dotées de caractéristiques physiques très diversifiées, elles offrent des potentialités variées pour l'extraction de matériaux de construction. Certains bancs calcaires se prêtent particulièrement bien à la production de pierre de taille, utilisée dans l'architecture locale, tandis que d'autres, plus friables, constituent une ressource privilégiée pour la chaux ou les granulats destinés aux mortiers et bétons. La présence d'une formation sableuse de type bruxellien ajoute un intérêt supplémentaire, puisque ce sable, par sa granulométrie, a pu jouer un rôle essentiel dans la fabrication de mortiers et comme complément dans les mélanges de construction. La formation argileuse d'origine alluviale, quant à elle, se distingue par ses propriétés plastiques, qui en font un matériau potentiel pour la production de briques dans un contexte artisanal ou industriel. À ces ressources majeures s'ajoutent encore des matériaux plus rares mais non dénués d'importance, tels que le schiste, exploité localement comme pierre de construction ou de parement, et la houille (*figure 49*). Enfin, la couverture pédologique est dominée par un limon à drainage différé (*figure 50*), dont les propriétés physico-chimiques, notamment sa texture et sa teneur en argile, le rendent adapté à la fabrication de briques en terre crue. Ce matériau offre une plasticité suffisante pour le moulage et une stabilité dimensionnelle après séchage, critères essentiels pour des performances.



Types de sous-sol

 Sables bruxelliens	 Calcaires d'Onoz (F. d'Onoz)
 Argiles (Limons quaternaires)	 Dolomies (F. de Namur)
 Calcaires noirs (F. de Viesville)	 Petit granit (F. de Ecaussines)
 Calcaires de Lives (F. de Lives)	 Barytine (F. du Hainaut)

Figure 49. Ressources du sous-sol de la zone d'étude. Crédit : d'après Delcambre (2002), adaptée par Daniel Djike (2025)



Types de sols

- Limoneux à drainage favorable
- Limoneux à drainage modéré
- Limoneux à drainage pauvre

Extractions

- Anciennes carrières
- Nouvelles carrières
- Futurs carrières

Figure 50. Ressource du sol de la zone d'étude. Crédit : d'après Delcambre (2002), adaptée par Daniel Djike (2025)

Ce contexte géologique a donné lieu à plusieurs phases d'exploitation dans le passé. Certaines de ces traces sont encore visibles, notamment celles de l'extraction de petit granit, une variété de calcaire crinoïdique également connue sous le nom de pierre bleue de Belgique, autrefois utilisée dans la construction de routes ou d'infrastructures ferroviaires. D'autres exploitations de roche calcaire, de plus petite envergure, ont également eu lieu, bien que leurs traces soient aujourd'hui plus diffuses, voire réintégrées dans le paysage sous forme de prairies humides ou de bosquets (Toussaint, 1975). À cela s'ajoute un ancien site d'extraction de barytine, exploité en puits de mine, aujourd'hui remblayé et réaffecté comme centre de collecte de terres d'excavation (Prevot, 2014).

Les vestiges les plus marquants aujourd'hui sont ceux de la « Carrière de Ligny », qui désignent en réalité deux sites distincts : la Carrière de Ligny-Plage (figure 51), reconvertie en étang de pêche et en site de plongée atteignant plus de 15 mètres de profondeur ; et la Carrière Vivaqua (figure 52), une ancienne carrière de calcaire, profonde de plus de 30 mètres, actuellement utilisée pour le pompage d'eau souterraine (Poseidon EAS asbl Mons, 2015). Ce second site,

aujourd'hui propriété privée de Vivaqua (anciennement C.I.B.E.), comprend une vaste excavation sous eau, un teruil boisé, un bassin de lagunage, des parois rocheuses, des pelouses rases entretenues naturellement, ainsi que plusieurs friches herbeuses. Bien que largement fermé au public, le site présente un intérêt écologique non négligeable : il abrite une flore calcicole rare dans cette région agricole et une faune malacologique diversifiée, rendue possible par la nature calcaire du substrat (SGIB, 2020).



Figure 51. La Carrière de Ligny-Plage. Crédit : EAS asbl (2015)

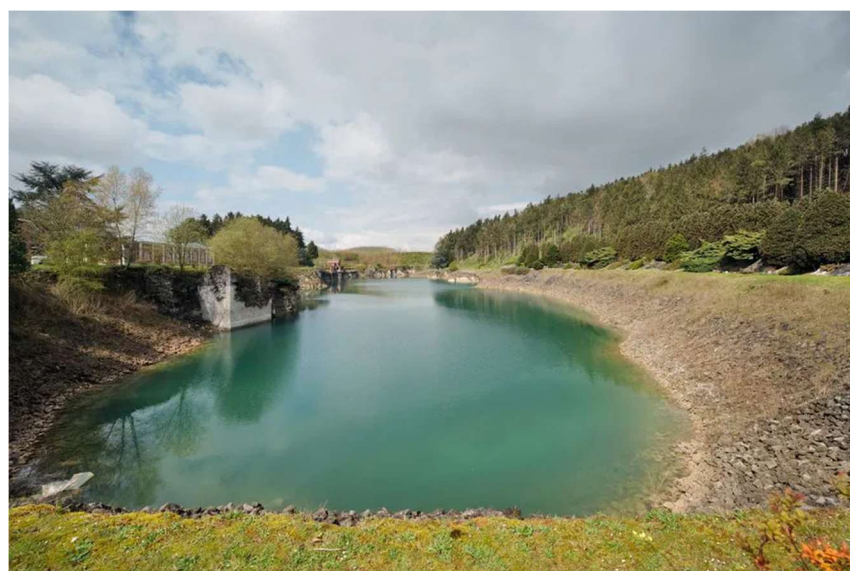


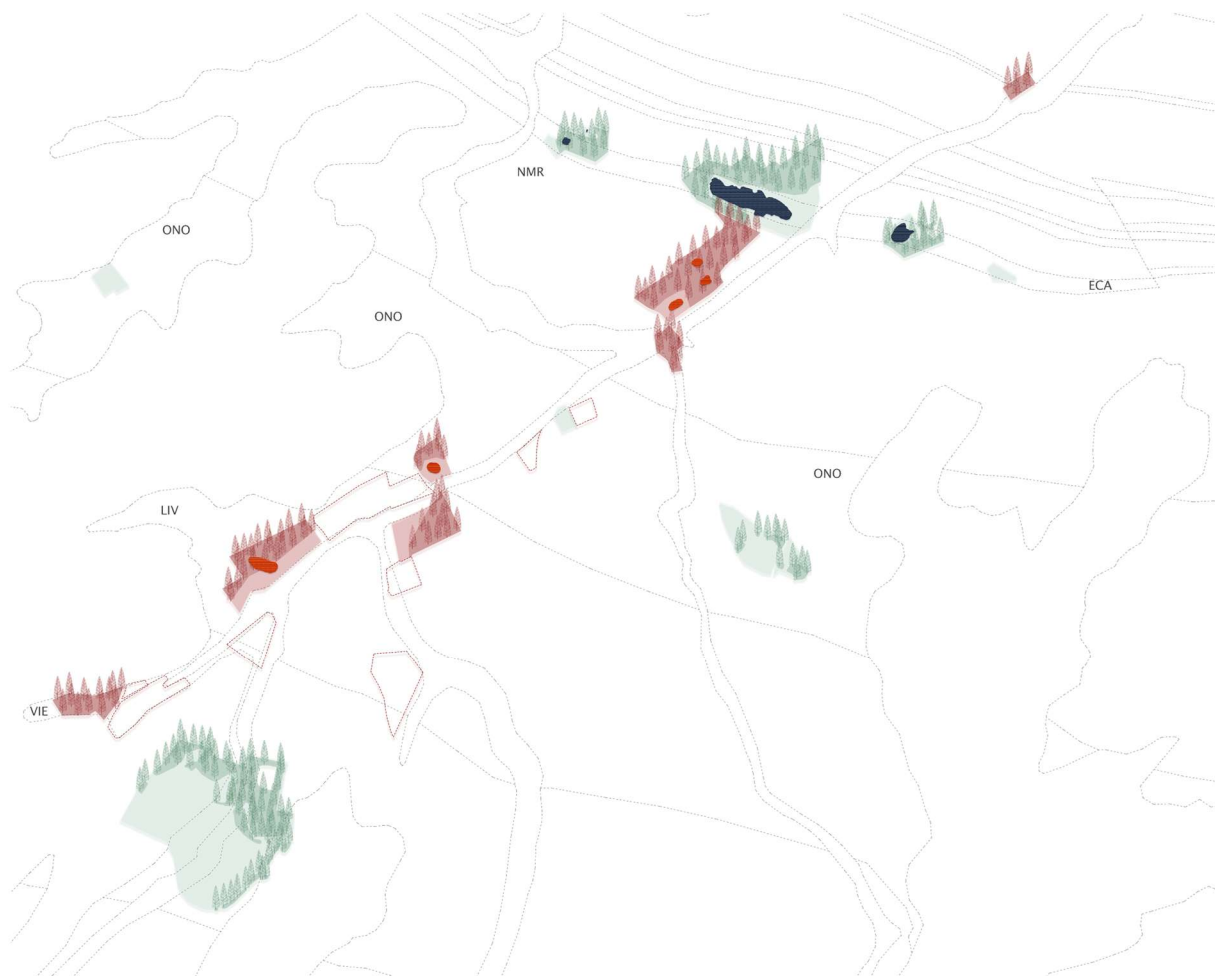
Figure 52. La Carrière Vivaqua. Crédit : EAS asbl (2020)

6.1.1. Renforcer les continuités écologiques





Ces différentes observations mettent en évidence encore une fois de plus, le rôle potentiel des futures carrières comme espaces privilégiés pour accueillir et développer une biodiversité spécifique, parfois rare à l'échelle régionale. C'est sur cette base que s'appuie notre premier scénario, dont l'objectif n'est donc pas seulement de répondre à une demande locale en matériaux de construction, mais aussi de concevoir la carrière comme un élément structurant du maillage écologique. Cette stratégie ne se limite pas à une simple valorisation post-extraction : elle envisage la carrière comme un maillon clé d'un réseau écologique aujourd'hui fragmenté, capable de reconnecter habitats naturels, corridors faunistiques et trames paysagères.

Le choix des implantations ne se limiterait plus à la seule présence d'une ressource minérale exploitable (*figure 53*) : il intégrerait aussi la capacité des sites à jouer un rôle écologique et hydrologique après leur exploitation. Les carrières, principalement de matières géosourcées telles que la pierre calcaire, l'argile ou même le sable seraient ainsi situées à proximité d'espaces naturels existants ou dans des zones où elles pourraient servir de relais à la biodiversité (*figure 54*), tout en offrant, pour certaines, en fin de vie, des fonctions de régulation hydrologique dans les secteurs soumis à un fort ruissellement.

Pour ce cas précis, notre scénario privilégie l'exploitation de matériaux géosourcés, notamment la pierre calcaire, abondamment présente dans la localité, afin de produire de la chaux. Ce choix repose sur plusieurs atouts stratégiques : matériau traditionnellement utilisé dans le village pour les enduits, mortiers ou comme stabilisant pour les constructions en terre, la chaux possède une empreinte carbone plus faible que le ciment lors de sa fabrication, et capte une partie du CO₂ émis au cours de son cycle de vie. L'utiliser à l'échelle locale permet de réduire considérablement les impacts liés au transport et de valoriser un savoir-faire constructif adapté au bâti existant.



Nouvelle extraction

-  Plan d'eau
-  Prairie humide
-  Forêt
-  Futur extraction

Ancienne extraction

-  Prairie humide
-  Forêt
-  Dépression dû à l'extraction
-  Terrils d'extraction

FORMATION GEOLOGIQUE

VIE (Formation de Viesville) :

Calcaires noirs et argileux en fines couches

LIV (Formation de Lives) :

Pour le concassage et la production de chaux.

ONO (Formation d'Onoz) :

Calcaires utilisés comme matériaux concassés.

NMR (Formation de Namur) :

Dolomite en lits métriques

ECA (Formation des Écaussinnes) :

Pierre bleue dense - petit granit

Figure 53. Projection des nouveaux sites d'extraction d'ici 2050 en fonction du sous sol. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

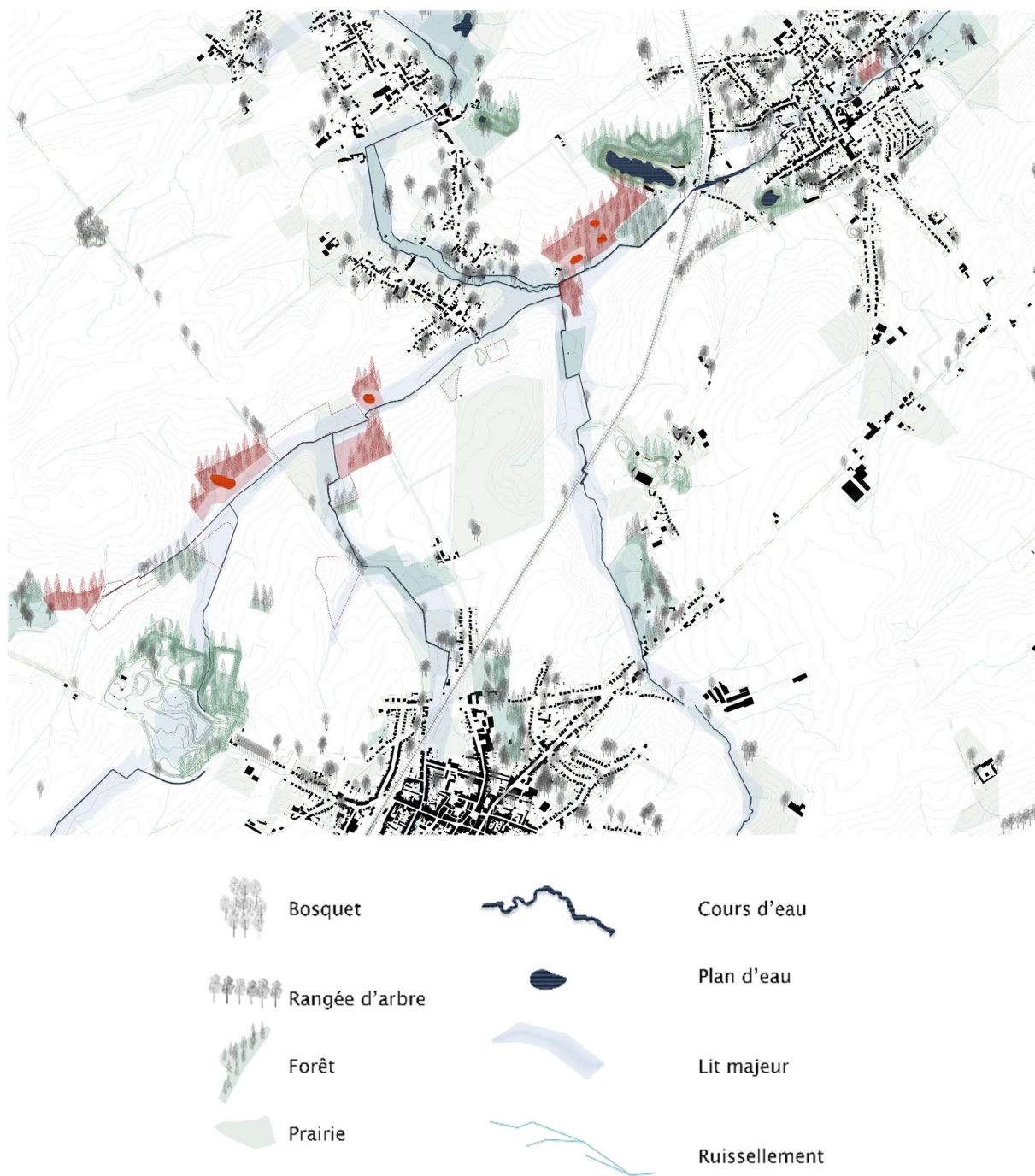


Figure 54. Nouveaux sites d'extraction proposés d'ici 2050 en rapport avec la biodiversité. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

6.1.2. Valoriser les traces du passé extractif

Dans la continuité de cette réflexion, il est essentiel de considérer le rôle que peuvent jouer les sites issus du passé extractif. Aujourd'hui, les anciennes carrières, bien que porteuses d'une mémoire paysagère et technique précieuse, apparaissent comme des espaces fragmentés et difficilement accessibles. Leur topographie marquée, leurs pentes abruptes ou les clôtures qui les entourent freinent leur appropriation par la population et limitent leur rôle dans le fonctionnement écologique du territoire.

Plutôt que de considérer ces vestiges comme de simples reliques, l'objectif est de les inscrire dans une logique évolutive, où l'histoire de l'extraction devient un levier pour penser l'avenir. L'articulation entre passé et futur prend ici tout son sens : les anciennes carrières, une fois réaménagées, peuvent servir de relais écologiques, de haltes pour la faune ou de points d'ancrage paysagers, venant prolonger et enrichir les fonctions prévues dans les sites nouvellement exploités.

Ce lien entre passé et futur repose sur la conviction qu'un territoire gagne en cohérence et en résilience lorsqu'il est pensé dans la continuité de ses transformations. En tenant compte des différentes phases de son histoire extractive et de ses usages successifs, il devient possible d'anticiper plus finement les évolutions à venir et d'intégrer les objectifs de restauration et de valorisation dès le début de la nouvelle exploitation (*figure 55*). Cette vision permet de ne pas attendre la fin de l'activité pour enclencher les aménagements écologiques et paysagers, mais de les faire évoluer en parallèle, garantissant ainsi une transition plus douce entre l'état productif et l'état post-extraction.

Une telle démarche favorise une mise en place plus rapide des habitats naturels et des continuités écologiques, tout en offrant aux habitants la possibilité de s'approprier progressivement les lieux au fil des transformations. Elle renforce également la lecture du paysage comme un système vivant, façonné par des usages successifs, et invite à percevoir l'extraction non pas comme une rupture, mais comme une étape dans un cycle plus large de valorisation territoriale.

Des aménagements ponctuels et respectueux tels que l'ouverture de cheminements, l'installation de plateformes d'observation ou la mise en place de dispositifs de médiation paysagère et écologique, joueraient un rôle clé pour relier entre eux anciens et nouveaux sites d'extraction (*figure 56*). Ces interventions ne seraient pas de simples ajouts décoratifs, mais de véritables leviers pour renforcer la biodiversité en créant des zones-refuges et des corridors écologiques, tout en offrant aux habitants des espaces d'accès et de découverte. Elles permettraient également de rendre lisible l'histoire extractive du territoire, en transformant les traces matérielles en supports pédagogiques et culturels. Ainsi, la trace de l'extraction ne serait plus perçue comme une cicatrice figée dans le paysage, mais comme un fil conducteur qui articule mémoire minérale et projet contemporain, et qui génère des bénéfices écologiques, sociaux et culturels durables.

Avant exploitation – vers 1780

Première exploitation - 1970

Nouvelle exploitation - 2030

Post-extraction - 2050

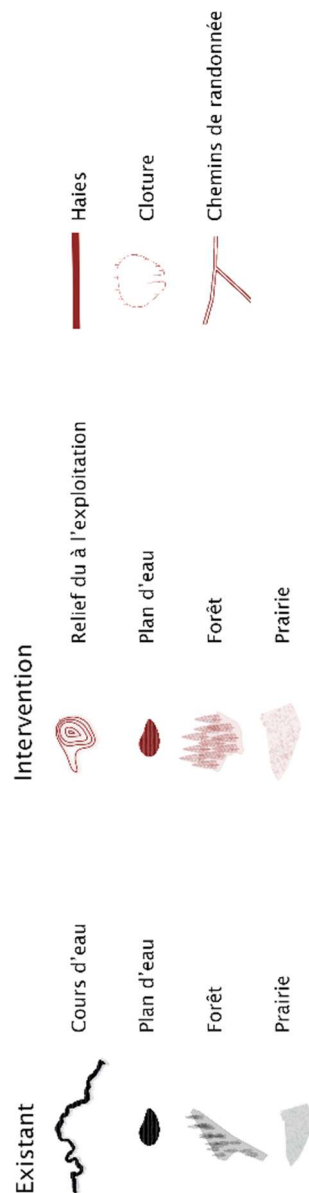
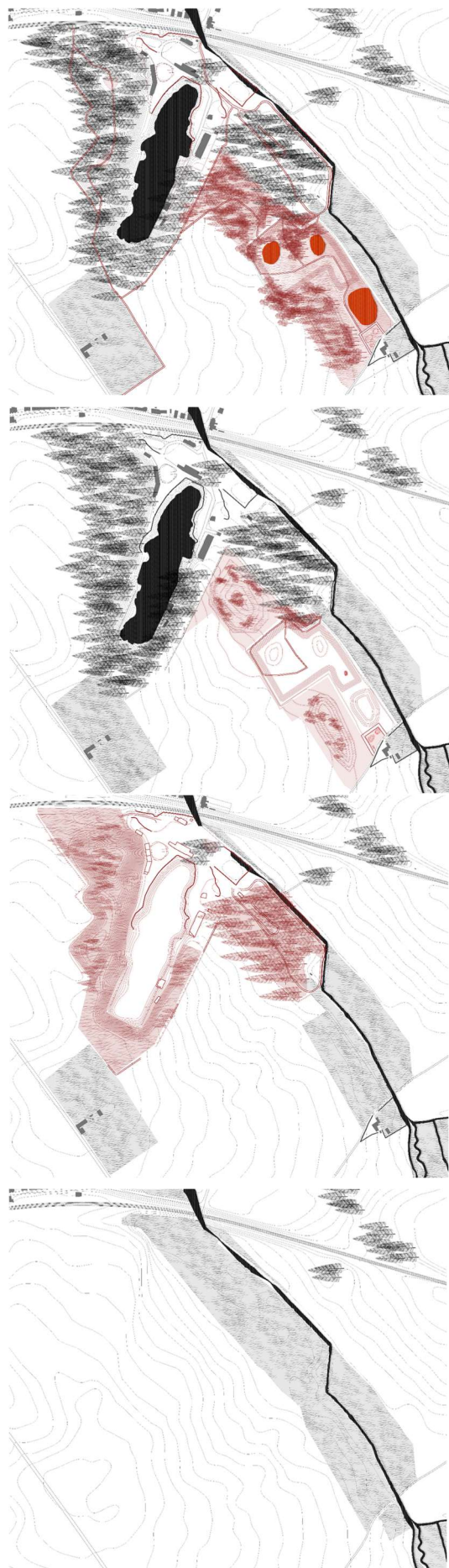


Figure 55. Phase d'exploitation d'une ancienne et nouvelle carrière de calcaire. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

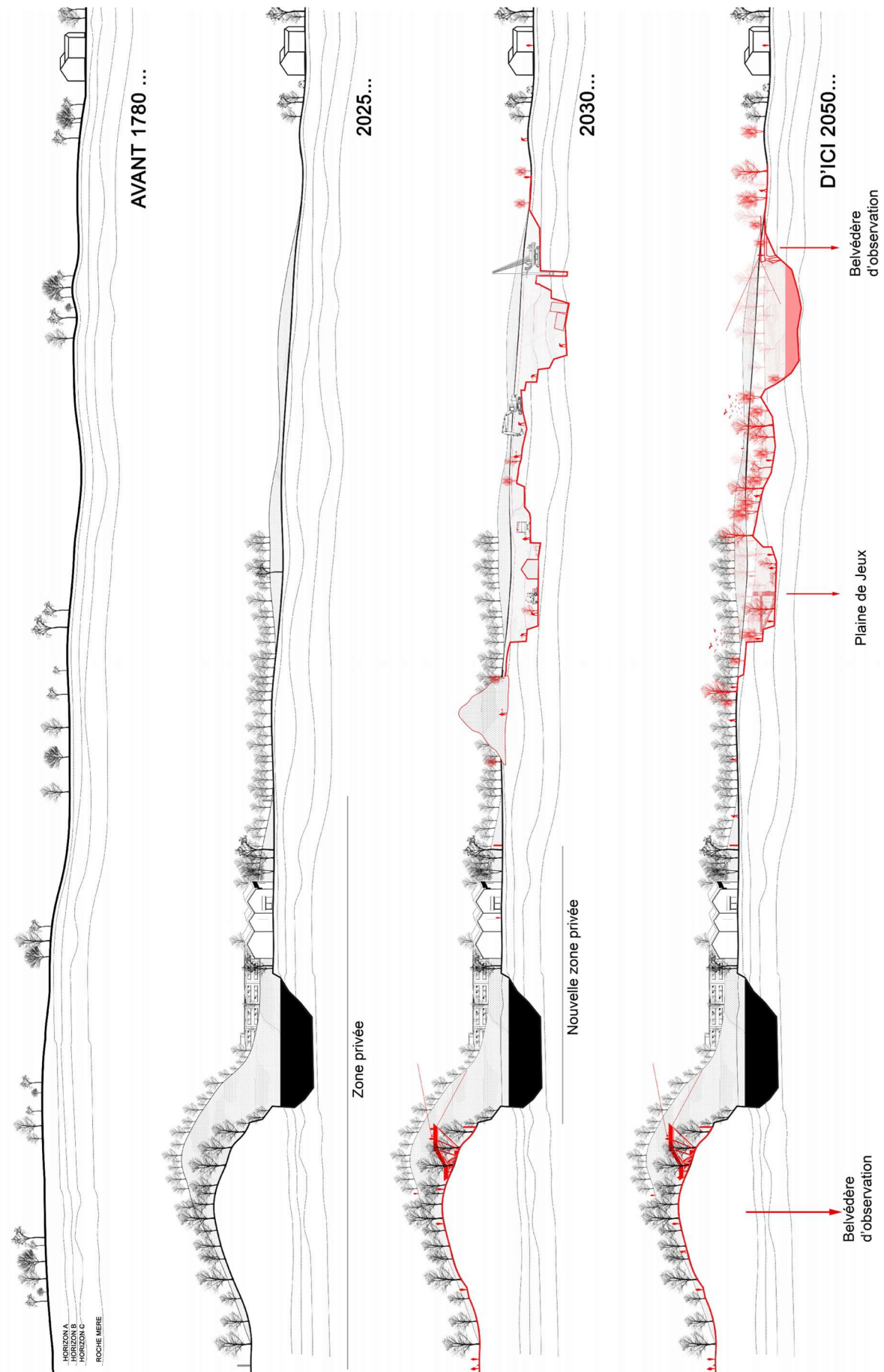


Figure 56. Phase d'exploitation d'une ancienne et nouvelle carrière de calcaire. Crédit : Daniel Dijke (2025)

6.2. Scénario 2 : l'extraction concertée comme levier de résilience territoriale

À la différence du premier scénario, qui mobilise l'exploitation de matériaux géosourcés sur un territoire beaucoup plus grand comme moyen de renforcer la biodiversité et de revaloriser les traces d'un passé extractif, ce second scénario propose une approche plus ancrée dans le quotidien. Il s'intéresse à la manière dont l'extraction de géosource peut être pensée à l'échelle du quartier, en lien étroit avec les habitants et leurs milieux de vie. Inscrit dans un contexte urbain, ce scénario imagine des interventions légères mais ciblées, où l'acte d'extraire devient un outil d'adaptation aux effets du changement climatique. Il s'agit de créer, au cœur même des zones habitées, des aménagements capables de répondre à des besoins concrets : zones de fraîcheur lors de fortes chaleurs, espaces de rétention en cas de pluies intenses, lieux de respiration, supports de biodiversité, et évidemment site d'extraction de matériaux géosourcés.

La mise en œuvre de ce scénario repose sur une dynamique collective. Les habitants ne sont pas seulement bénéficiaires des transformations, mais aussi acteurs de la démarche. Accompagnés par des dispositifs communaux ou des professionnels, ils participent à la définition des besoins, à la réflexion sur les usages futurs et à la mobilisation des espaces disponibles à l'échelle du quartier. Lorsque des terrains ou parcelles apparaissent propices à accueillir ce type d'intervention, un dialogue peut être engagé avec les propriétaires. Ceux-ci peuvent, de manière volontaire, mettre à disposition leur bien, en contrepartie d'un certains nombres d'avantage communal. L'extraction envisagée est limitée dans le temps mais produit un aménagement durable. Le creux, conçu avec soin, donnera naissance à un espace ouvert, intégré à la vie du quartier. Il deviendra une véritable infrastructure climatique de proximité, issue d'une démarche collaborative, et pensée pour répondre aux enjeux actuels tout en renforçant le lien entre les habitants et leur territoire.

6.2.1. Îlots de chaleur et ruissellement

À l'image de nombreux territoires urbains, le cas de Ligny présente une forte imperméabilisation des sols liée à son développement résidentiel. Ce type d'urbanisation favorise une accumulation importante de chaleur en surface, entraînant des élévations de température localisées. Ce phénomène, appelé îlot de chaleur urbain, se manifeste par des écarts thermiques significatifs entre les zones construites et les espaces naturels avoisinants (*figure 57*). L'étude menée par Bruxelles Environnement dans la capitale a clairement démontré l'ampleur du phénomène (*figure 58*). Lorsque certaines conditions sont réunies, notamment une forte densité bâtie, une faible couverture végétale, la présence de matériaux absorbant la chaleur ; la température de l'air peut dépasser de jusqu'à 10°C celle mesurée dans les zones rurales ou forestières proches, ou même par rapport aux moyennes régionales (Bruxelles Environnement, 2025). Cette surchauffe locale est liée au remplacement des surfaces végétales et perméables par des infrastructures minérales (bâtiments, routes, parkings) ; mais aussi à la concentration des activités humaines. Les émissions de chaleur issues des systèmes de climatisation, des réseaux souterrains, ou encore de la circulation automobile contribuent à intensifier ce phénomène (Bruxelles Environnement, 2025). La réduction de la capacité

d'évaporation et d'ombrage dans l'environnement immédiat limite d'autant plus la dissipation de la chaleur accumulée pendant la journée.

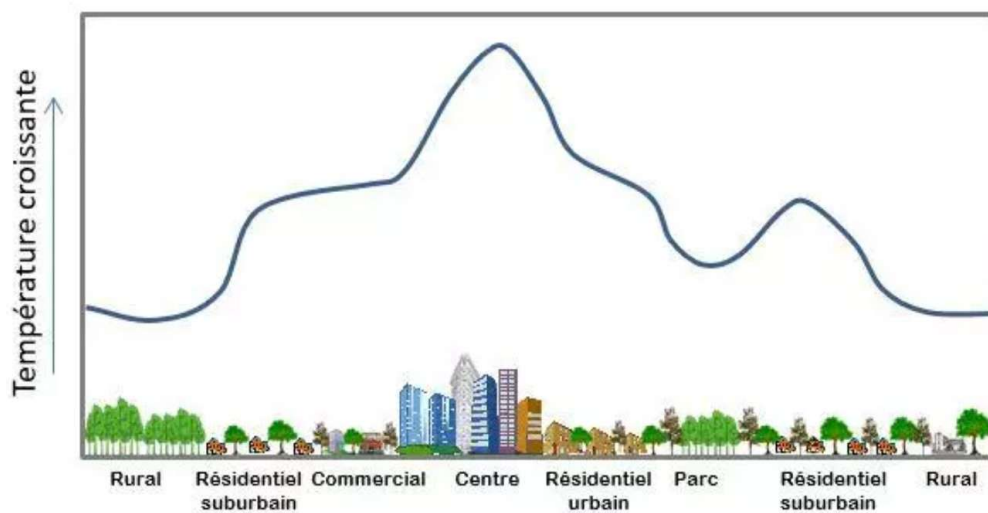


Figure 57. Illustration du profil thermique caractéristique d'un îlot de chaleur urbain. Crédit: Akbari et al. (1992)

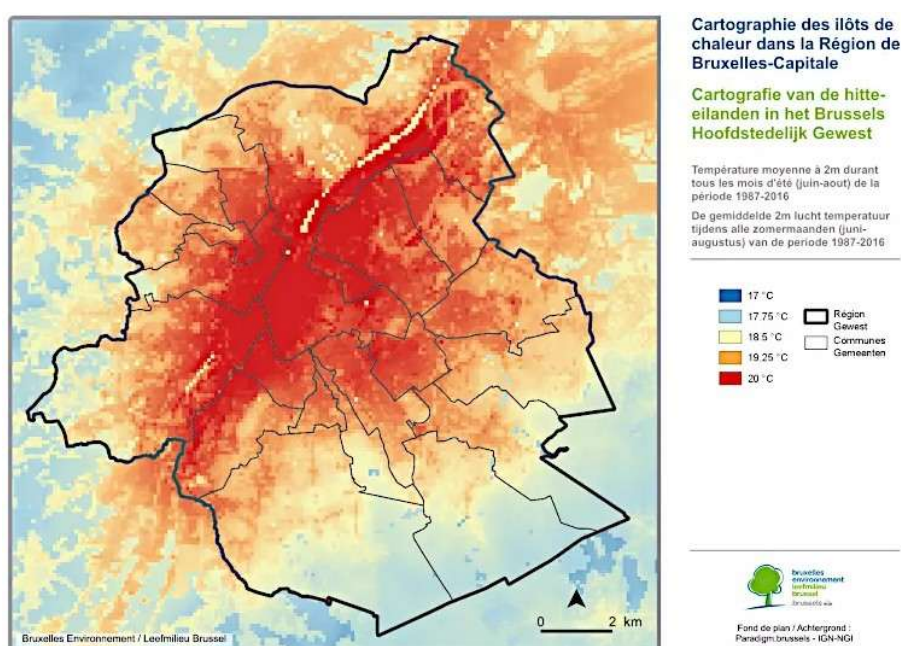


Figure 58. Ilot de chaleur à Bruxelles : cartographie des températures moyennes durant les mois d'été de la période 1987-2016. Crédit : VITO (2018)

Bien que notre terrain d'étude, qui est situé dans la localité de Ligny, ne présente pas la même intensité urbaine que Bruxelles, les effets de l'îlot de chaleur y sont bien réels. Des écarts de température supérieurs à 7°C ont été relevés dans certains quartiers en période estivale (*figure 59*), ce qui confirme la présence marquée du phénomène à l'échelle communale (WalOnMap, s. d.).

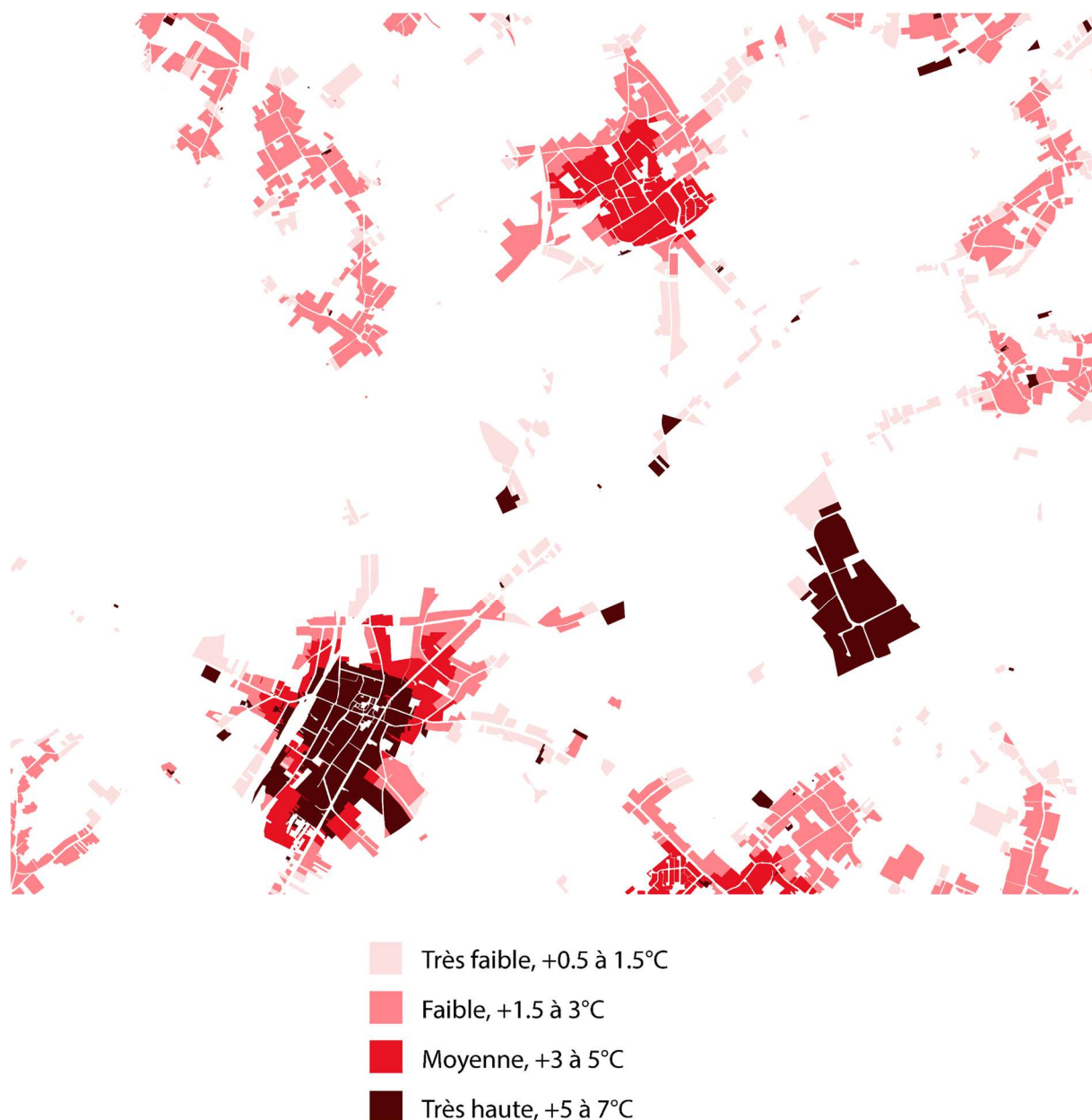


Figure 59. Ilot de chaleur à Fleurus, Augmentation de la température en fonction de la densité d'habitation. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

À cette problématique thermique s'ajoute une vulnérabilité marquée face aux phénomènes d'inondation et de ruissellement intense. L'épisode de juillet 2021 a mis en lumière les limites des systèmes actuels de gestion des eaux pluviales dans une grande partie du bassin Sambre–Meuse. Notre zone d'étude a également été concernée, comme l'attestent les données du Géoportail de la Wallonie, qui indiquent plusieurs parcelles inondées à la suite du débordement du cours d'eau nommé La Ligne (*figure 60*). Bien que les dégâts y aient été moins importants que dans les vallées de la Vesdre et de l'Ourthe, ils restent néanmoins significatifs dans la vallée de la Sambre, mettant en évidence des points faibles dans la gestion locale des eaux et soulignent l'urgence d'adopter des mesures capables de mieux contenir ces épisodes extrêmes.



Figure 60. Aléa d'inondation et zone inondées en 2021. Crédit : Aliciane Paoli (2025)

6.2.2. Carrière et adaptation territoriale

En croisant les données liées aux îlots de chaleur, avec celles des aléas d'inondation et des zones effectivement inondées lors de l'épisode de juillet 2021, il est possible de faire ressortir des secteurs où les risques se cumulent (*figure 61*). Ces zones, à la fois exposées à une augmentation significative des températures et vulnérables aux excès d'eau, concentrent des déséquilibres environnementaux majeurs. Elles apparaissent dès lors comme des espaces stratégiques pour tester de nouvelles approches d'aménagement résilient. Parmi ces secteurs, une parcelle de territoire dans le village de Ligny se distingue (*figure 62*). Ce contexte local cumule plusieurs critères favorables : une densité d'habitat suffisante, une vulnérabilité avérée au ruissellement, accentuée par la présence d'un cours d'eau (la Ligne) qui traverse la parcelle, ainsi que la présence de terrains potentiellement mobilisables. Ces caractéristiques en font un site pertinent pour envisager la mise en œuvre d'un projet pilote d'extraction douce, intégrée au tissu existant et pensée comme un levier de régulation thermique et hydraulique à l'échelle du quartier.

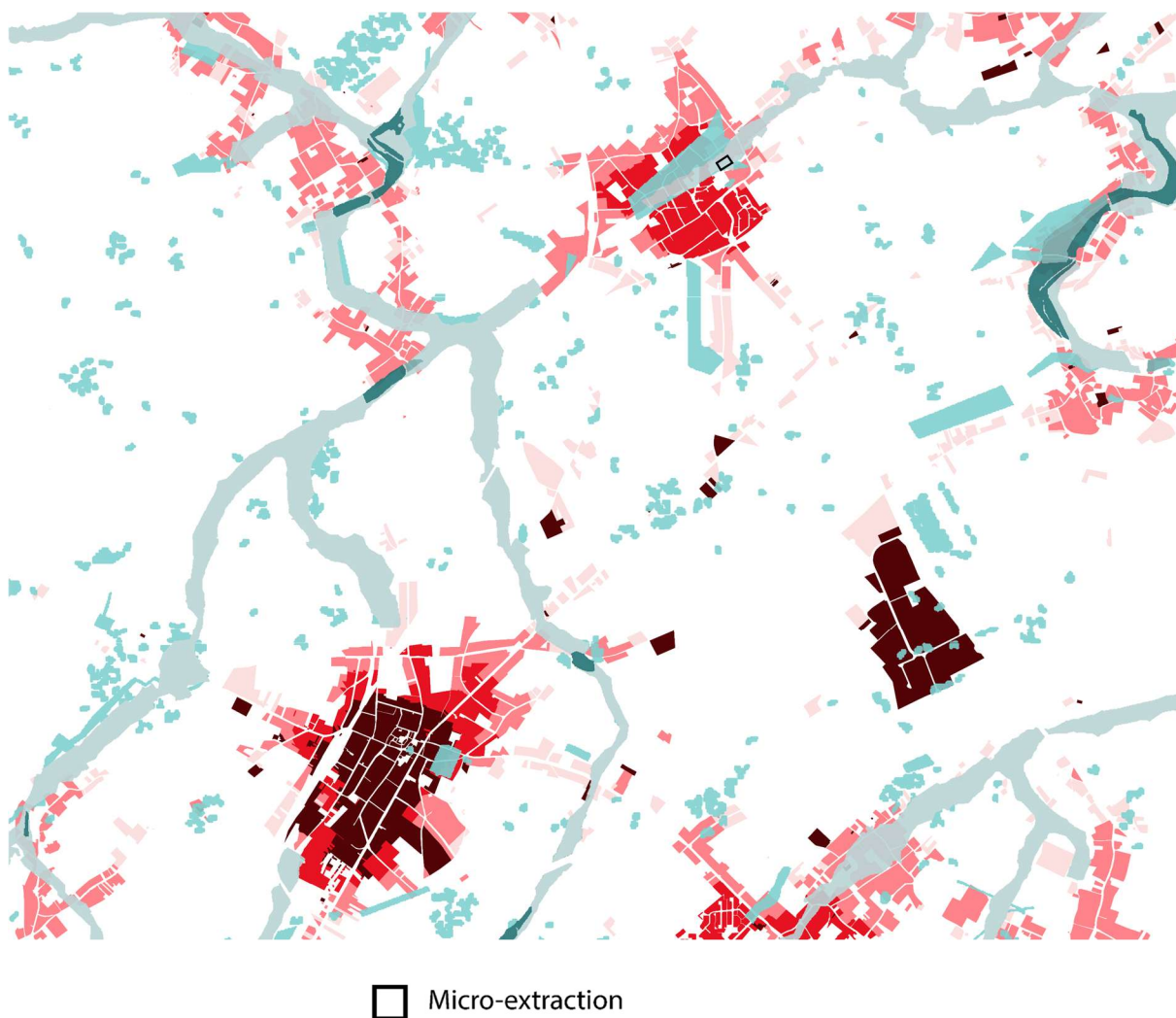


Figure 61. Superposition des risques îlot de chaleur et inondation. Crédit : Daniel Djike (2025)



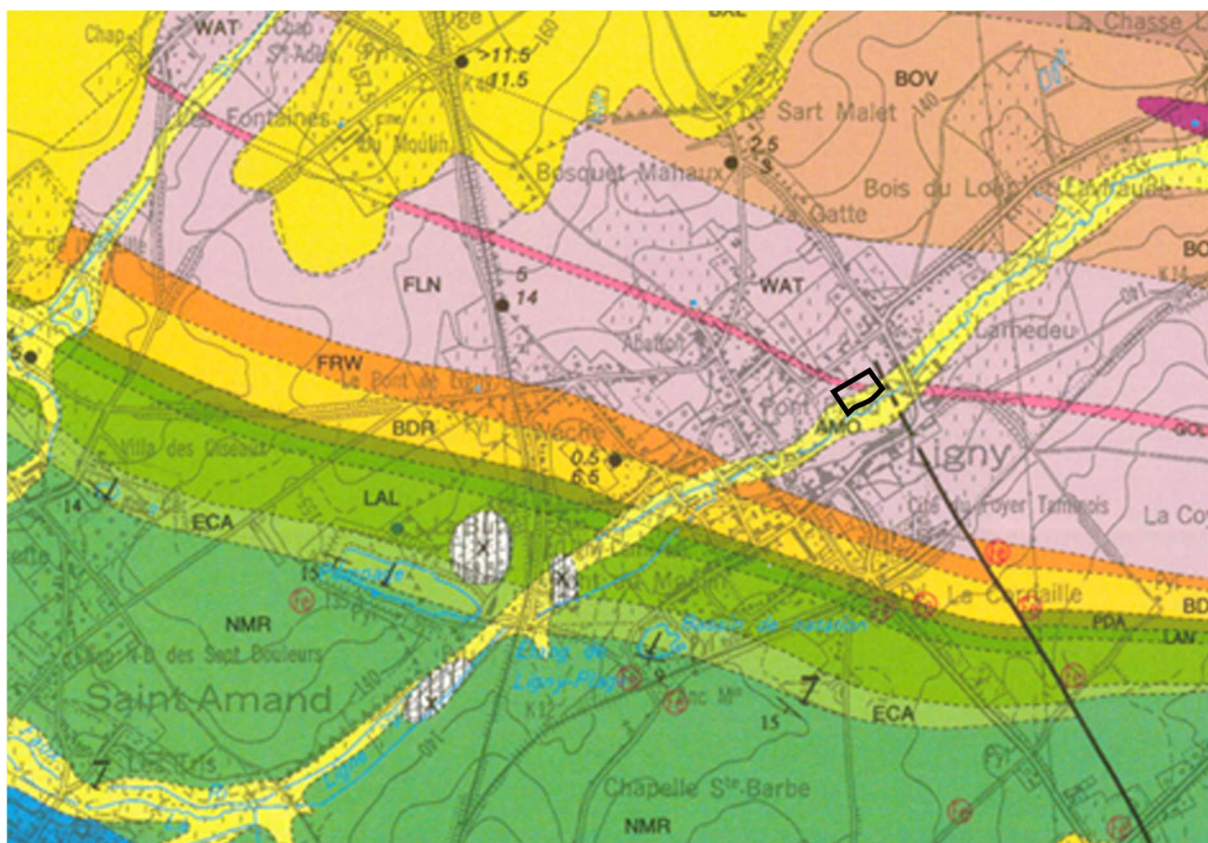
0 km 0,5 km 1 km



Figure 62. Site d'intervention. Crédit : Daniel Djike (2025)

L'analyse des cartes géologiques et pédologiques de la parcelle identifiée dans le village de Ligny révèle la présence, en sous-sol (*figure 63*), de formations de type AMO, ou *Alluvions Modernes*. Ces dépôts alluviaux, laissés par les cours d'eau et leurs affluents sur le fond des vallées, sont constitués de couches hétérogènes de graviers, sables, limons et argiles, déposés au fil du temps par les dynamiques fluviales (Delcambre & Pingot, 2008). Ce type de formation est particulièrement intéressant en raison de la diversité granulométrique des matériaux qu'il contient. En surface (*figure 64*), le sol se caractérise par une dominante très limoneuse et un drainage naturellement faible (Delcambre & Pingot, 2008). Cette composition, souvent considérée comme une contrainte en agriculture, est dans notre cas un atout pour des pratiques de construction en terre crue (Houben & Guillaud, 1995).

Les matériaux disponibles sur le site, issus à la fois du sol et du sous-sol, offrent ainsi un fort potentiel pour des pratiques constructives sobres, fondées sur l'usage de ressources naturelles locales, mobilisables sans transformation industrielle lourde.



Types de sous-sol

■ Argiles (Limons quaternaires)

Extractions

□ Nouvelle extraction

Figure 63. Ressources du sous sol de la micro-extraction. Crédit : Delcambre (2002)



Types de sols

- Limoneux à drainage favorable
- Limoneux à drainage modéré
- Limoneux à drainage pauvre

Extractions

- Nouvelle extraction

Figure 64. Ressources du sol de la micro-extraction. Crédit : Delcambre (2002)

Le site d'intervention, qui comprend des jardins privés, un pâturage, un cours d'eau et une trame bâtie significative (*figure 65*), présente une structure paysagère à la fois souple et variée, particulièrement propice à une requalification progressive. Cette configuration facilite une transformation par étapes, respectueuse des usages actuels et encourageant une appropriation progressive par les habitants. Grâce à cette flexibilité, l'aménagement peut s'intégrer harmonieusement au tissu local, s'adaptant aux besoins changeants du quartier tout en renforçant les connexions entre espaces naturels et zones de vie.

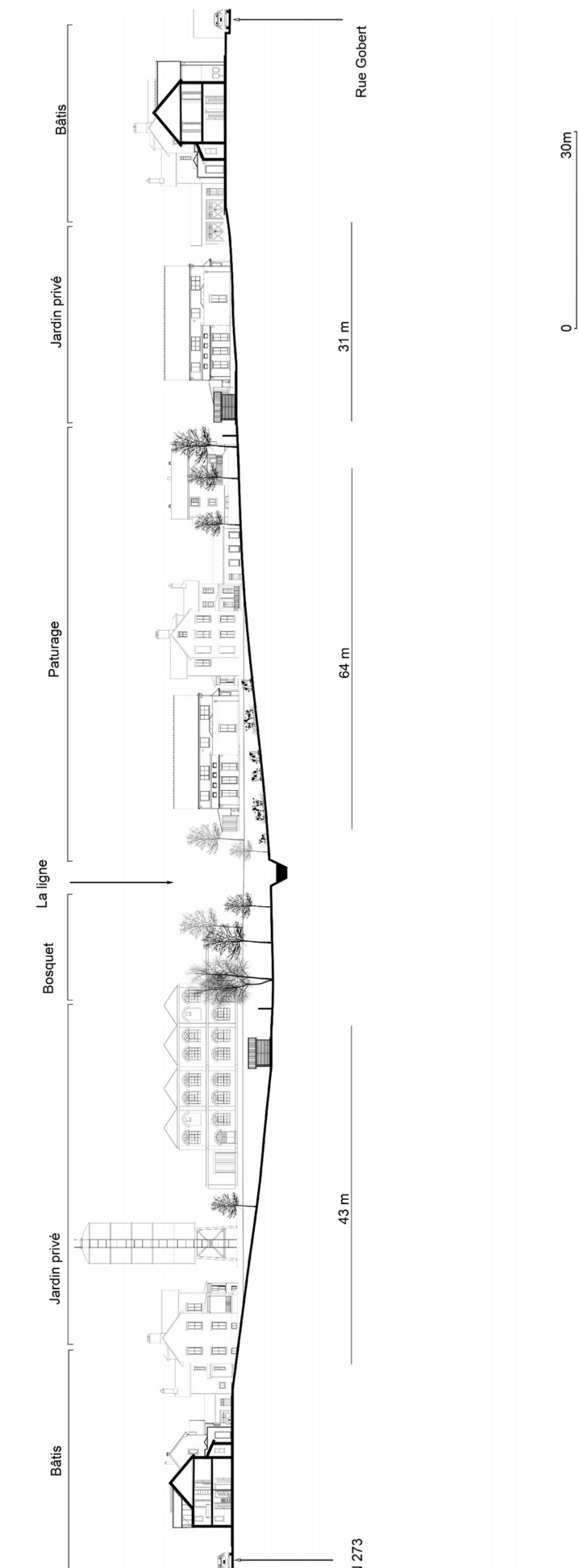


Figure 65. Organisation spatiale et éléments du territoire existant. Crédit : Daniel Djike (2025)

Dans ce scénario, l'extraction est volontairement pensée à petite échelle. L'hypothèse retenue repose sur une excavation peu profonde environ 2,80 mètres et limitée à une surface restreinte d'environ 2 000 m². Cette intervention ponctuelle et limitée dans le temps est conçue pour s'insérer dans un îlot urbain habité sans perturber excessivement le quotidien des riverains.

L'extraction vise les terres situées dans les horizons superficiels du sol (*figure 66*), notamment l'horizon B reconnues pour leur qualité en tant que « terres à bâtir ». Pour réduire au maximum la durée des travaux dans le quartier, la matière extraite est rapidement transportée vers un site extérieur de collecte de terres d'excavation. Ce transfert permet d'écourter la présence du chantier sur place, tout en assurant un stockage et un tri dans des conditions plus appropriées en dehors du tissu résidentiel dense.

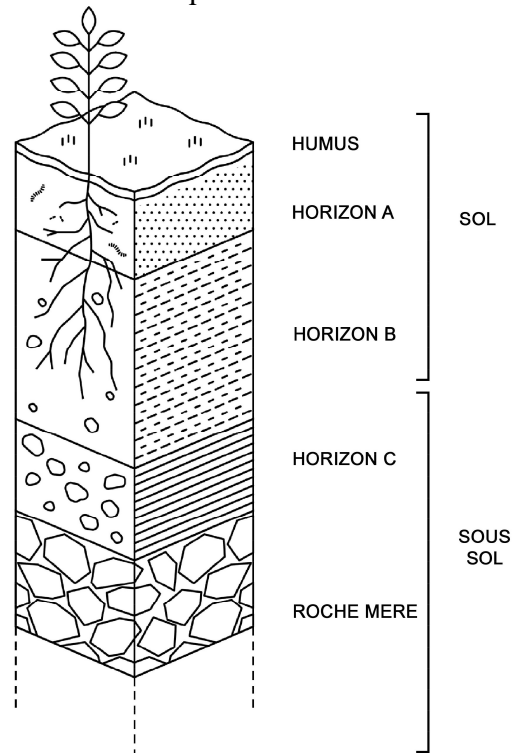


Figure 66. Les horizons du sol. Crédit : Daniel Djike (2025)

Ce dispositif ouvre la voie à une nouvelle manière de concevoir l'extraction : une opération brève, ciblée, mais pleinement intégrée à une logique territoriale plus large. Il permet également d'anticiper la transformation du site dès la phase d'exploitation, en amorçant simultanément certaines actions d'aménagement comme la plantation d'arbres, la structuration de nouveaux usages collectifs, etc ; sans attendre la fin complète de l'extraction. L'enjeu est de penser extraction, post-extraction et valorisation de la matière dans une temporalité fluide et continue (*figure 67*).

La terre ainsi collectée est ensuite utilisée localement, notamment dans des chantiers de rénovation ou de construction, en mettant en valeur des savoir-faire liés à la mise en œuvre de la terre crue. Cette approche s'inscrit dans une logique de résilience constructive, ancrée dans les ressources et les pratiques du territoire.

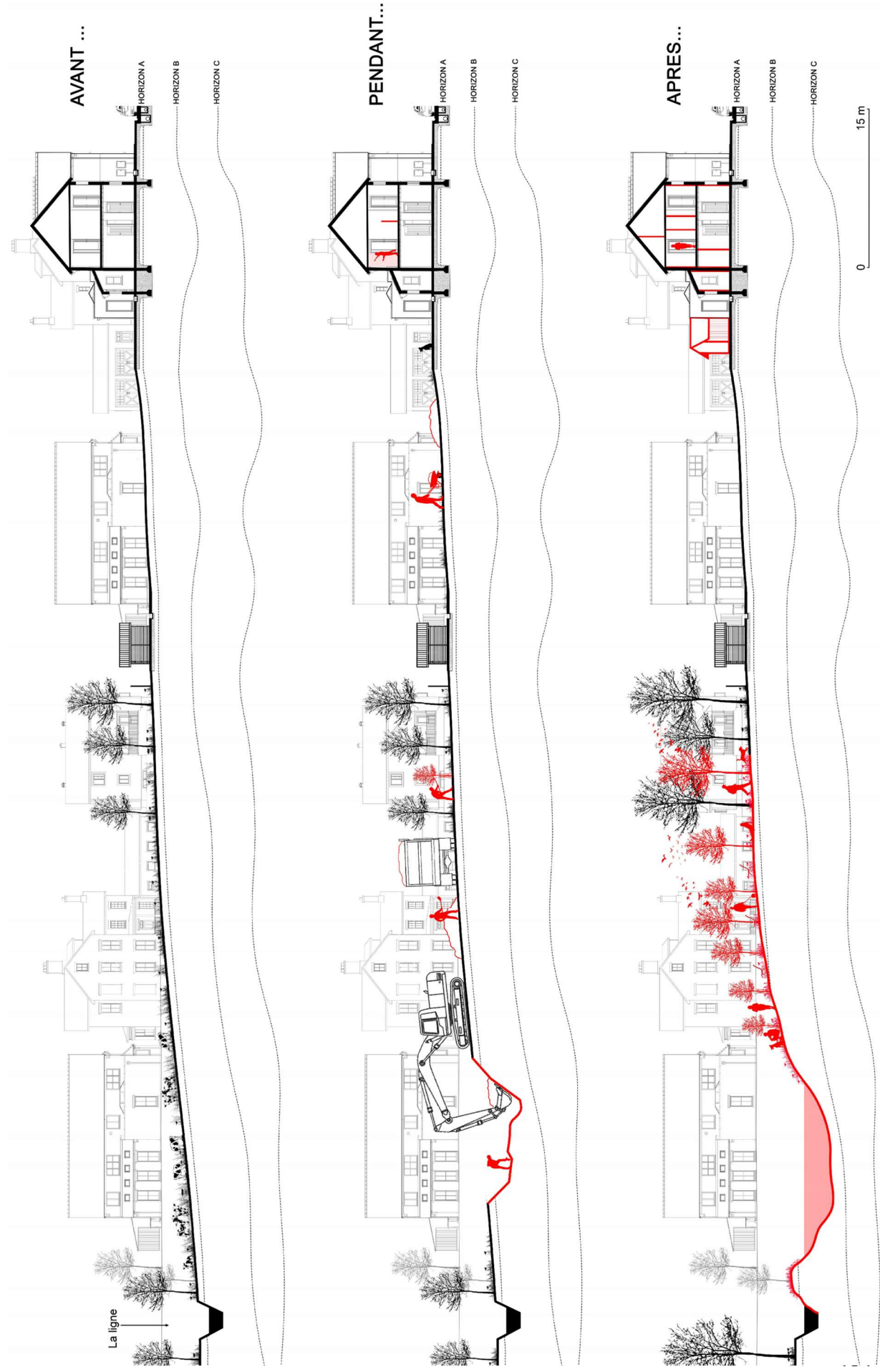


Figure 67. Dynamique d'extraction de geosourcé. Crédit : Daniel Djike (2025)

L'expérimentation menée, montre qu'il est possible de porter un autre regard sur les sites d'extraction, trop souvent considérés comme des espaces résiduels ou dégradés. Lorsqu'elles sont pensées de manière intégrée, ces interventions peuvent générer de nouveaux usages et transformer ces lieux en véritables fragments de paysage habité.

En créant ponctuellement des ouvertures dans la trame bâtie, l'extraction modeste de matériaux géosourcés, conçue dès le départ comme une intervention à la fois spatiale et climatique, permet de réintroduire de la porosité dans un tissu urbain souvent dense et saturé. Ce vide nouvellement créé facilite l'infiltration naturelle des eaux pluviales, tout en favorisant la circulation de l'air, essentielle pour renouveler les masses d'air chaud stagnantes. Par ailleurs, l'aménagement de ces espaces ouverts offre un terrain propice à l'installation d'une végétation diversifiée. Cette végétation joue un rôle clé dans la création d'ombre, l'augmentation de l'humidité ambiante et la réduction de la température locale grâce au phénomène naturel d'évapotranspiration.

Ces interventions contribuent ainsi à la formation d'îlots de fraîcheur localisés (*figure 68*), véritables microclimats tempérés qui atténuent les effets des îlots de chaleur urbains. En milieu urbain ou semi-urbain, ces zones rafraîchies améliorent le confort thermique des habitants, favorisent la biodiversité locale et participent activement à la résilience du territoire face aux épisodes de chaleur extrême, de plus en plus fréquents dans le contexte du changement climatique.

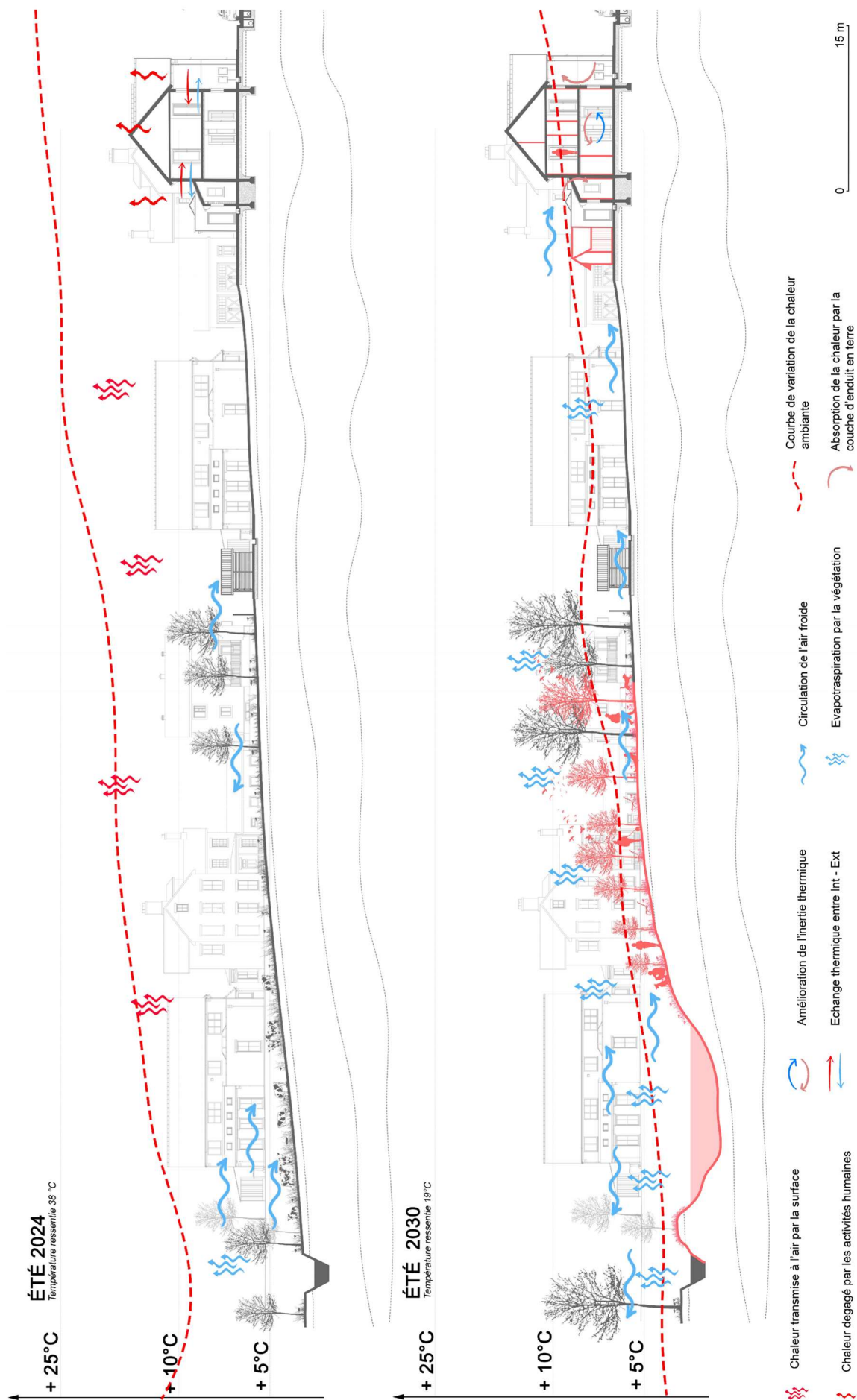


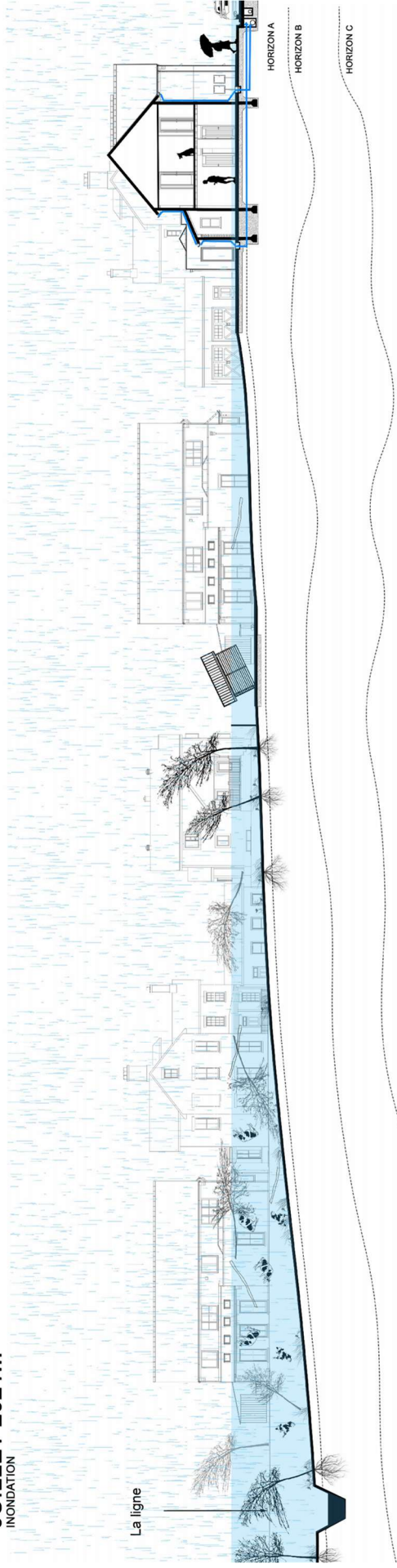
Figure 68. Gestion des îlots de chaleur. Crédit : Daniel Dijke (2025)

En plus de ses effets sur la régulation thermique, la cavité générée, du fait de sa configuration en cuvette, joue un rôle actif dans la gestion des eaux pluviales. Cette dépression, implantée au sein d'un noyau villageois, permet de capter les eaux de ruissellement issues des surfaces bâties environnantes. En interceptant ces flux à la source, elle réduit la charge sur les réseaux d'évacuation et diminue le risque de débordement de la Ligne (*figure 69*). Le sol, rendu perméable également grâce à la végétation, facilite l'infiltration progressive de l'eau, limitant les écoulements directs vers l'aval. Ce principe de rétention naturelle permet d'absorber temporairement les surplus générés lors d'épisodes orageux.

Ce type d'aménagement introduit ainsi une logique de gestion intégrée de l'eau à l'échelle locale. Il ne s'agit plus uniquement de détourner l'eau mais de l'accueillir dans l'espace public, en réactivant le rôle hydraulique du sol. Le creux, bien positionné dans le quartier, devient un espace tampon, discret mais stratégique, au service de la résilience urbaine.

JUILLET 2021...

INONDATION



DECEMBRE 2030...

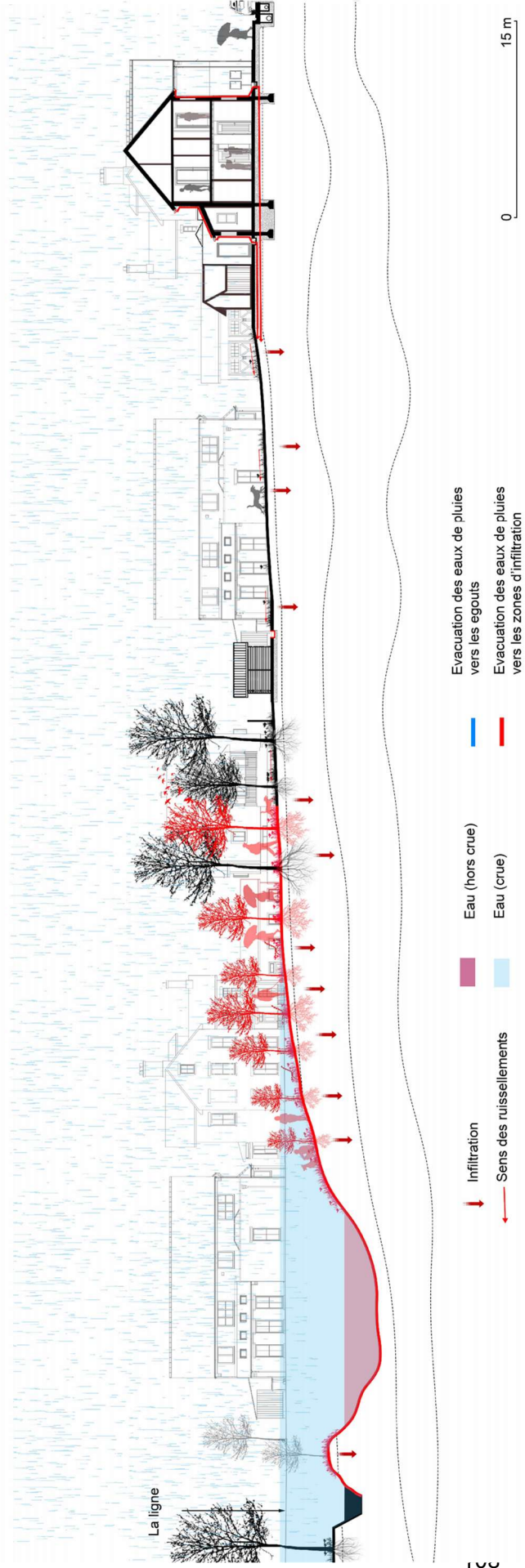


Figure 69. Gestion des ruissellements et des inondations. Crédits : Daniel Dijke (2025)

7. Hypothèses d'usage des matériaux géosourcés extraits

Dans les scénarios envisagés, les matériaux retenus sont exclusivement d'origine géosourcée. Ce choix s'inscrit dans une volonté de réduire le recours à des matériaux industriels à forte empreinte carbone, comme le béton, dont la production engendre des émissions massives de CO₂ ainsi que d'importantes nuisances environnementales. Contrairement à ces matériaux fortement transformés, les ressources géosourcées peuvent être utilisées sans nécessiter de transformations industrielles lourdes et irréversibles, ce qui réduit considérablement l'énergie grise ainsi que les impacts liés au transport. Leur recyclabilité (*figure 70*) et leur compatibilité avec les cycles naturels en font également des candidats privilégiés pour une approche constructive plus circulaire. La terre crue par exemple, sur le plan technique, offre des propriétés reconnues, notamment en matière de confort thermique et hygrométrique, qui contribuent à la qualité de l'habitat.

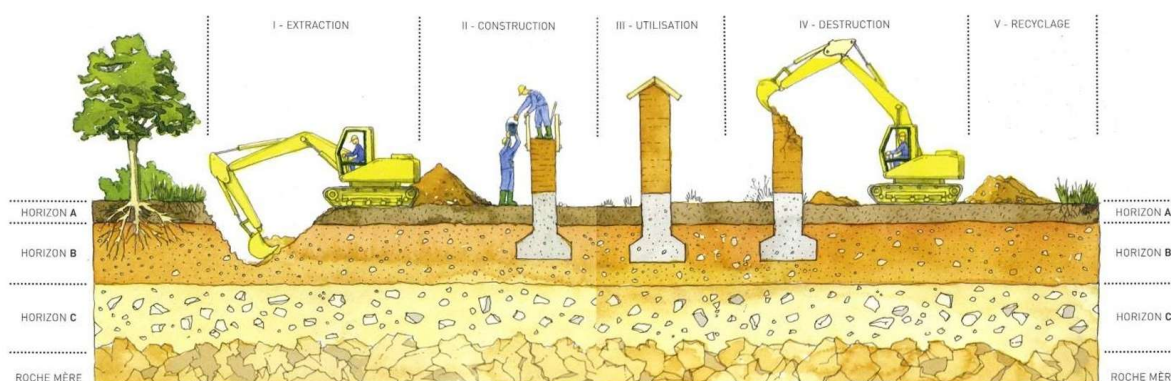


Figure 70. Cycle de vie de la terre crue. Crédit : Anger et Fontaine (2009)

Le territoire de Ligny illustre bien ce potentiel. La terre argilo-limoneuse issue des dépôts alluviaux s'avère particulièrement adaptée aux usages en terre crue, tandis que la présence abondante de calcaire renvoie à une tradition ancienne de production de chaux. Cette dernière est attestée par les vestiges de sept anciens fours à chaux identifiés dans le sous bassin versant de l'Orneau, souvent situés à proximité immédiate de carrières et de châteaux édifiés à partir de ces ressources (Giot & Leurquin, 2013). Ce passé extractif, aujourd'hui largement oublié, constitue une opportunité pour l'avenir : il offre la possibilité de réactiver un savoir-faire vernaculaire et de le mettre au service des enjeux contemporains, alliant sobriété, valorisation des ressources locales et performance environnementale.

7.1. Stratégies de gestion et circularité territoriale

La gestion des matériaux géosourcés envisagée dans ce projet s'appuie sur les infrastructures existantes et sur une logique de circularité territoriale. Les ressources extraites des différents sites seraient acheminées vers l'ancienne carrière de barytine, aujourd'hui reconvertie en site de regroupement et de traitement par l'ASBL Walterre. Ce type d'installation n'est pas isolé : on en recense environ cinq dans l'ensemble du sous-bassin versant de l'Orneau (*figure 71*). Ces plateformes récupèrent les terres issues des excavations de chantier, les trient selon leur niveau de pollution et leur granulométrie, pour ensuite les valoriser, garantissant ainsi une gestion maîtrisée de la ressource (Walterre, 2018).

Dans les scénarios proposés, ce site stratégique, déjà opérationnel dans la logistique et le tri, deviendrait également un espace de stockage des matériaux issus des chantiers, afin de réduire au minimum la durée d'exploitation des carrières actives. Il accueillerait en outre la construction d'un four à chaux artisanal communautaire (*figure 71*), conçu comme un centre de production, de transmission et d'expérimentation. Ce dispositif permettrait de produire une chaux adaptée aux usages constructifs tout en offrant aux habitants, artisans et étudiants la possibilité de se réappropriier les techniques anciennes dans un cadre collaboratif.

L'ambition est de structurer un véritable écosystème local de matériaux, capable de réduire les distances de transport, de stimuler l'emploi sur le territoire et d'assurer la réversibilité des filières par la réutilisation et le recyclage en fin de vie.

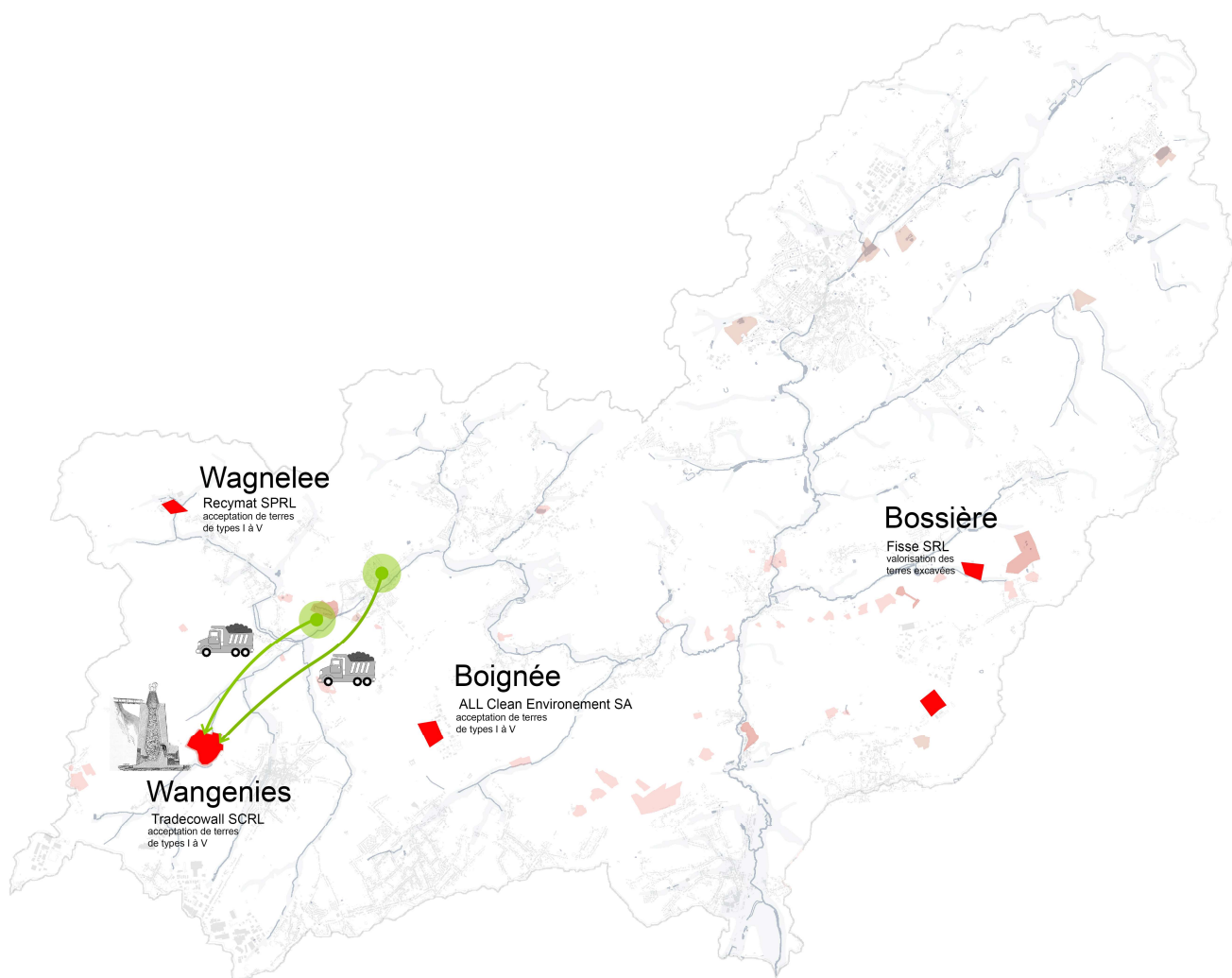


Figure 71. Sites de collecte de matière et parcours des ressources de nos scénarios. Crédit : Daniel Djike (2025)

7.2. Applications en construction

Dans la continuité de la stratégie de valorisation locale, les matériaux géosourcés extraits et transformés sur site se prêtent à un large éventail d'usages constructifs (*figure 72*), depuis la structure même des bâtiments jusqu'à leurs finitions. Leur intérêt repose autant sur leur adaptabilité que sur leur adéquation avec le contexte territorial, offrant ainsi des solutions sobres, performantes et en continuité avec les savoir-faire traditionnels.

Les éléments porteurs peuvent bénéficier directement des propriétés de la terre crue, qu'elle soit stabilisée à la chaux pour gagner en résistance et en durabilité, ou allégée par l'ajout de fibres végétales pour améliorer son comportement mécanique. Selon les besoins, elle peut être mise en œuvre sous forme de briques moulées ou pressées, de pisé ou encore de panneaux préfabriqués. Ces techniques associent de bonnes performances structurelles à une forte inertie thermique et à une régulation naturelle de l'humidité intérieure (Perrot et al., 2018), ce qui les rend particulièrement adaptées aux extensions, rénovations ou constructions neuves à faible impact. Parallèlement, le sable, associé à la chaux et aux particules argileuses naturellement présentes dans la terre, constitue un élément clé pour la production de mortiers, essentiels à l'assemblage et à la cohésion des structures.

À mesure que l'on se rapproche de la couche protectrice du bâti, ces mêmes mélanges permettent de formuler de mortiers, d'enduits et de badigeons respirants. Ces revêtements assurent la protection des parois tout en préservant leur capacité d'échange hygrométrique, un atout déterminant pour les bâtiments anciens aux murs parfois massifs et peu ventilés (Perrot et al., 2018).

Les potentialités ne s'arrêtent pas là : enduits décoratifs terre-chaux ou terre-paille, sols en terre battue, doublages isolants ou correcteurs thermiques sur parois froides, voire mobilier intégré façonné directement en terre, viennent compléter le panel d'applications (Paulus, 2015). Dans chaque cas, la malléabilité, la réversibilité et la faible énergie grise de ces matériaux offrent une grande souplesse d'adaptation, tout en favorisant la transmission des savoir-faire.

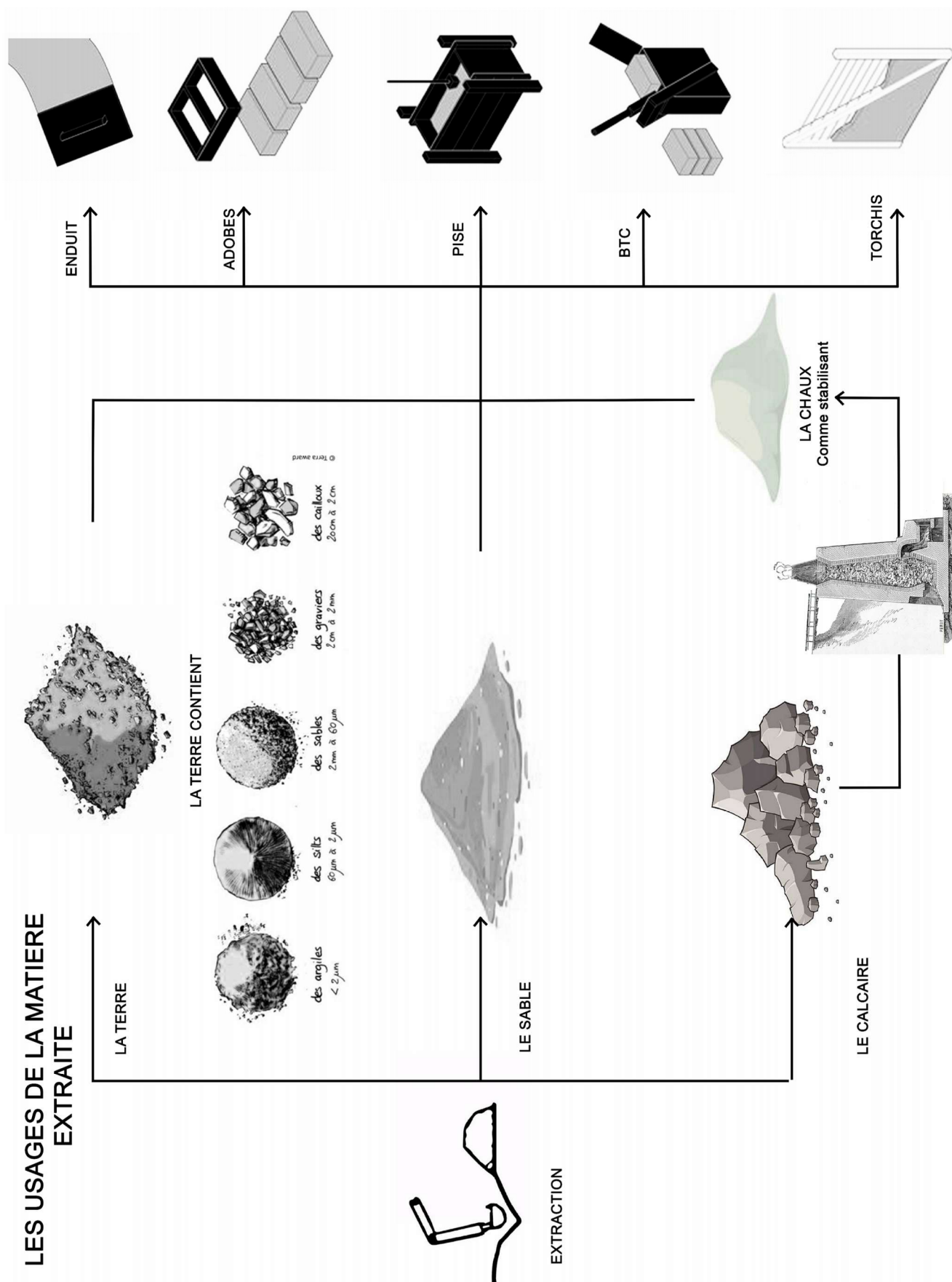


Figure 72. Les usages des matériaux extraits. Crédit : Daniel Djike (2025)

7.3. Expérimentations et mise en évidence du potentiel

Pour compléter notre processus de recherche et rendre tangible la matière étudiée, nous avons imaginé un scénario fictif d'un propriétaire local souhaitant réaliser des travaux de rénovation, comprenant un rafraîchissement et l'ajout de cloisons intérieures. Compte tenu du temps limité, nous avons recherché à Liège un site présentant une formation pédologique similaire à celle de notre scénario (*figure 73*), afin de prélever de la terre provenant de l'horizon de type B (*figure 74*). Nous avons choisi ce chantier de construction au Sart Tilman, près de la Rue Centre Spatial, 4031 Liège, où des travaux de fouille et de fondation nous ont permis d'extraire la terre à la profondeur adéquate. Environ 10 kg ont ainsi été collectés.



Rue Gobert 5140 Sombreffe / Ligny



Rue du Centre Spatial 4031 Liège / Sart Tilman

Figure 73. Formation pédologique et site d'extraction des scenarios. Crédit : Daniel Djike (2025)



Figure 74. Profil pédologique du chantier de construction au Sart Tilman. Crédit : Daniel Djike (2025)

Afin de réaliser nos prototypes dans le délai imparti, nous avons associé cette terre à des matériaux, tels que de la chaux, du sable disponible en magasin, ainsi que des fibres de miscanthus. À partir de ces composants, plusieurs mélanges ont été élaborés pour la fabrication de briques d'adobe et la préparation d'enduits, permettant ainsi de tester différentes formulations.

Dans un premier temps, une analyse granulométrique de la terre extraite a été effectuée, grâce au test de la bouteille (*figure 75*) et au test du cigare. Ces tests permettent de caractériser la composition granulométrique du matériau. Pour un enduit, on recherche une granulométrie plus fine afin d'obtenir une bonne adhérence et une surface lisse. À l'inverse, pour la fabrication de briques, la présence d'un squelette granulaire plus grossier est souhaitable pour assurer la résistance mécanique et limiter le retrait au séchage (Paulus, 2015).

Les résultats obtenus, après 24 heures de décantation, ont confirmé que la terre utilisée est riche en particules fines, avec des grains de sable d'environ 5 mm, et une faible teneur en argile. Cette composition est idéale pour la réalisation d'enduits de corps ou de finition, mais insuffisante pour produire des briques résistantes. Cela implique la nécessité d'ajuster la formulation en ajoutant des particules plus grossières, notamment des cailloux d'environ 20 mm de diamètre, afin de renforcer la structure des briques.



Figure 75. Test granulométrique à la bouteille. Crédit : Daniel Djike (2025)

Pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux, nous avons eu recours à la stabilisation à la chaux. Celle-ci permet de limiter les retraits et fissurations, d'augmenter la résistance à l'eau et d'améliorer la solidité mécanique des briques sur le long terme. Par ailleurs, l'ajout de fibres végétales, bien que souvent moins efficaces que la chaux pour certaines caractéristiques, contribue aussi à limiter les fissures dues au retrait et à renforcer la résistance à la flexion et aux chocs.

Les différents mélanges réalisés pour les enduits sont: (*figure 76 et 77*)

1. Terre + sable ;
2. Terre + chaux + sable + argile rouge ;
3. Terre + chaux + sable ;
4. Terre + chaux + sable + fibre de miscanthus



Figure 76. Test d'enduit en terre crue. Crédit : Daniel Djike (2025)



Figure 77. Test d'enduit de Terre + chaux + sable + fibre de miscanthus avec ajout de colorant. Crédit : Daniel Djike (2025)

Pour les briques d'adobe : *(figure 78)*

1. Terre + cailloux + fibre+ chaux
2. Terre + cailloux + fibre + chaux + sable



Figure 78. Test de briques. Crédit : Daniel Djike (2025)

Ces échantillons, laissés à sécher à l'air libre pendant un week-end, ont donné des résultats contrastés. Les briques se sont montrées solides et prometteuses, tandis que certains enduits en particulier les mélanges **2 et 3 (Terre + chaux + sable + argile rouge ; Terre + chaux + sable)** ont présenté des fissures (*figure 79*). Celles-ci sont probablement liées à un excès d'eau ou de chaux dans la formulation, ou encore à l'absence de fibres capables de consolider la matrice et de limiter les retraits au séchage.

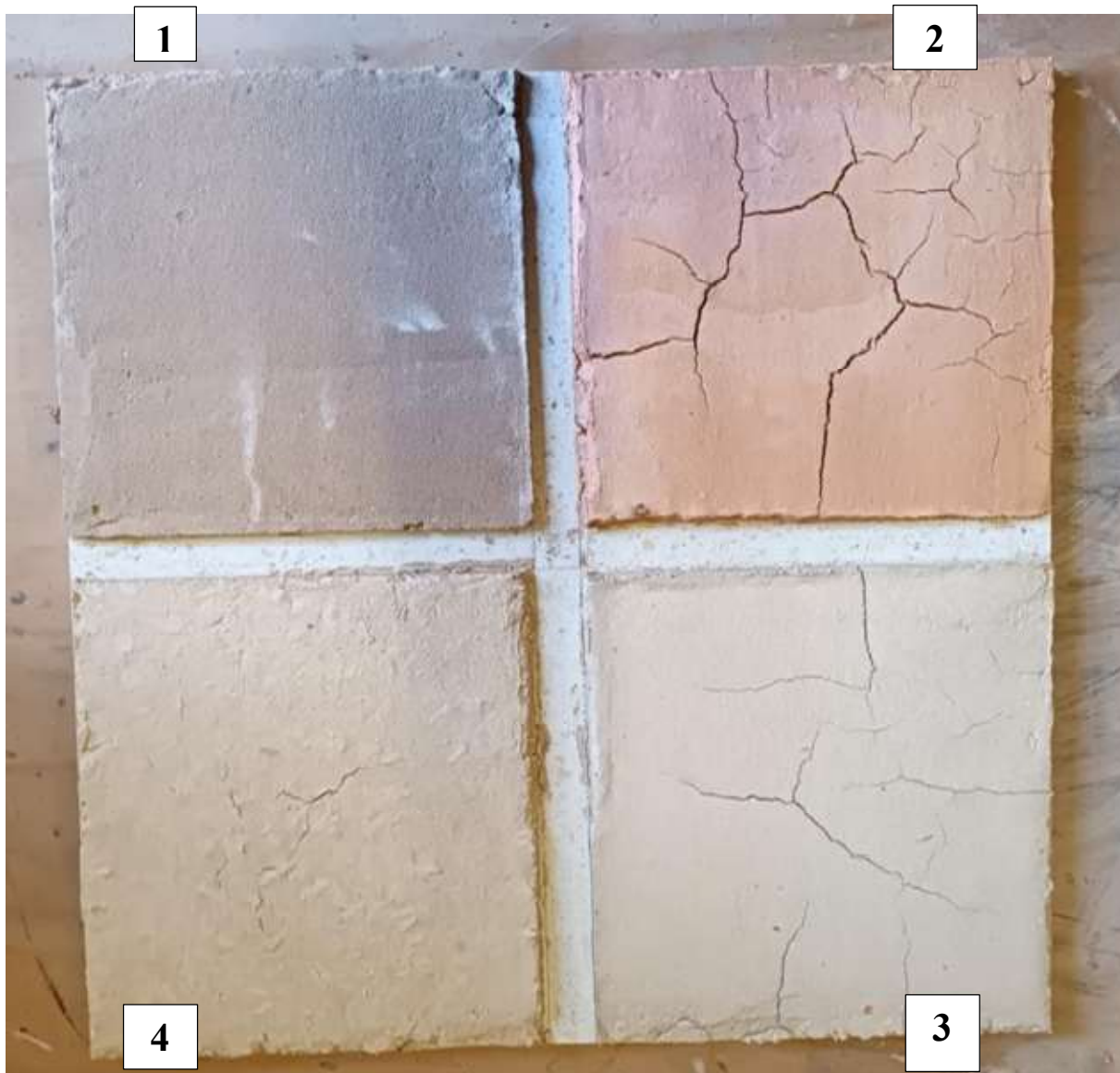


Figure 79. Résultat des tests d'enduits. Crédit : Daniel Djike (2025)

Ces observations soulignent l'importance d'affiner les formulations, en particulier les proportions entre terre, chaux et eau, afin d'optimiser les performances des matériaux. Elles confirment néanmoins le potentiel réel des ressources locales, accessibles et malléables, pour développer une filière constructive durable. Ce travail expérimental constitue une première étape vers un processus d'amélioration continue, dans lequel les connaissances et savoir-faire locaux jouent un rôle central.

Conclusion

Dans un contexte où les crises environnementales et sociales imposent de repenser en profondeur nos modes de production et de construction, ce travail a montré que l'activité extractive, souvent perçue uniquement à travers ses impacts négatifs, peut devenir, lorsqu'elle est pensée de manière raisonnée et territorialisée, un véritable levier de transformation positive. Les matériaux géosourcés apparaissent non seulement comme des ressources constructives à faible impact, mais aussi comme des moteurs capables de générer des dynamiques écologiques, paysagères et sociales, porteuses de sens.

L'intégration des principes de l'architecture régénérative a révélé que l'extraction peut être conçue comme un outil d'aménagement capable de restaurer des continuités écologiques, de valoriser des héritages industriels et de proposer de nouvelles qualités d'usage pour les habitants. Autrement dit, les "trous" laissés par l'extraction cessent de symboliser uniquement une perte : ils deviennent réservoirs de biodiversité, espaces publics atypiques ou supports d'infrastructures vertes. La carrière cesse alors d'être une cicatrice pour devenir une matrice de projet.

C'est précisément à travers la recherche par le projet que cette évolution de regard a été rendue possible. Le projet a permis de confronter les principes théoriques de la régénération aux spécificités concrètes d'un territoire donné : son histoire, ses contraintes, ses atouts, mais aussi ses besoins futurs. Sans cette mise en situation, l'étude serait restée générale et abstraite, limitée à la formulation de modèles génériques de reconversion et de fermeture de site, déconnectés des réalités locales et donc difficilement opérants. Le fait d'élaborer des scénarios d'intervention a non seulement donné corps aux idées, mais il a aussi mis en évidence la différence entre une logique de durabilité (qui vise à limiter les dommages) et une démarche régénérative (qui cherche à améliorer activement la santé écologique, sociale et territoriale). Faire projet a donc transformé la réflexion en outil d'action, révélant ce qui serait resté invisible à travers une analyse purement conceptuelle.

Cependant, Cette approche reste toutefois confrontée à plusieurs défis. Sa mise en œuvre suppose un cadre de gouvernance clair, capable de rassembler acteurs publics, privés et citoyens, ainsi qu'une adaptation réglementaire permettant d'envisager des projets hybrides où production matérielle et régénération se complètent. Elle demande aussi un changement culturel profond dans la manière de percevoir l'extraction, entre stigmatisation et valorisation.

Malgré ces contraintes, les perspectives ouvertes demeurent vastes : expérimenter sur des sites pilotes, développer des filières locales de matériaux géosourcés et intégrer ces démarches dans les outils d'urbanisme. Ces pistes montrent que chaque projet d'extraction peut être envisagé non plus comme une consommation d'espace et de matière, mais comme une opportunité de régénération, où l'acte d'extraire peut devenir aussi un acte de soin pour les écosystèmes, pour les territoires et pour les communautés humaines.

Bibliographie

ARTICLES SCIENTIFIQUES

- Armstrong, R. (2023). Introducing regenerative architecture. *Journal of Chinese Architecture and Urbanism*, 6(1), 1882. <https://doi.org/10.36922/jcau.1882>
- Ayudhia.s. (2015). Que sont les ressources géologiques? Groupe de recherche sur les ressources géologiques non conventionnelles. <https://ugrg.ft.ugm.ac.id/articles/what-it-resources-geology/>
- Bréard, P. A. (2022). La mine : Prospection et développement. <http://pour-un-reveil-ecologique.org/fr/articles/mine-prospection-developpement/>
- Calas, G. (2016). Les ressources minérales, enjeu majeur du développement durable : Leçon inaugurale prononcée le jeudi 22 janvier 2015. Collège de France. <https://doi.org/10.4000/books.cdf.4748>
- Capellaro, F., Demailly, D., & Papaux, P. (2020). L'écologie industrielle territoriale en France : Bilan et perspectives. *Revue Française de Gestion Industrielle*, (2).
- Duquenne, G., & Ore, S. (2010). Activités extractives en Wallonie. <https://etopia.be/blog/2010/12/03/activites-extractives-en-wallonie/>
- Etopia. (2010, décembre 3). Activités extractives en Wallonie. <https://etopia.be/blog/2010/12/03/activites-extractives-en-wallonie/>
- Foissac, M., Jouault, C., Dumesny, R., & Foissac, G. (2022). Du design bio-inspiré au design systémique : La régénération à l'épreuve des pratiques de design. *Sciences du Design*, 16(2), 86–101. <https://doi.org/10.3917/sdd.016.0086>
- Joffroy, T. (2016). Les architectures de terre crue : Des origines à nos jours. In H. Jacquet (Éd.), *Savoir & faire : La terre* (pp. 333–347). Actes Sud. <https://hal.science/hal-01861816>
- Kafu-Quvane, B., & Mlaba, S. (2024). Assessing the impact of quarrying as an environmental ethic crisis: A case study of limestone mining in a rural community. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(4), 458. <https://doi.org/10.3390/ijerph21040458>
- Perrot, A., Rangeard, D., Menasria, F., & Guihéneuf, S. (2018). Strategies for optimizing the mechanical strengths of raw earth-based mortars. *Construction and Building Materials*, 167, 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.055>

- Prugnard, M. (2024, mars 19). Architecture : Redécouvrir des matériaux oubliés et écologiques. *Espaces Contemporains*. <https://espacescontemporains.ch/redecouvrir-des-materiaux-oublies/>

OUVRAGES / LIVRES

- Brady, N.C., & Weil, R.R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition
- Cuney, M. (2023). RESSOURCES MINÉRALES - Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/ressources-minerales/>
- Durieux, G. (2015). *Expertise du petit patrimoine populaire (préinventaire)*. Province de Namur. https://www.patrimoineculturel.org/documents/fichier/1/2/20200505_141839p rovince de namur expertise du petit patrimoine de jemeppe sur sambre par george durieux.pdf
- El Warcha, S., Deléglise, T., & Baccar, M. (2023). *Faire architecture avec la terre*. Éditions B42.
- Gauzin-Müller, D., Sémon, P., & Doat, P. (2016). *BD Les techniques de la terre crue : Architecture en terre d'aujourd'hui*. <https://frugalite.org/wp-content/uploads/2024/01/BD-Les-techniques-de-la-terre-crue-Architecture-en-terre-d-ajourd-hui.pdf>
- Giot, J.-L., & Leurquin, J. (2013). *Géologie de la vallée de l'Orneau et de ses environs*.
- Habert, G., Arribe, D., Morel, J. C., & Walker, P. (2020). *Building materials and the climate: Constructing a new future*. United Nations Environment Programme. <https://www.scribd.com/document/675918749/Building-Materials-and-the-Climate-1696121277>
- Houben, H., & Guillaud, H. (1995). *Traité de construction en terre*. Parenthèses.
- Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. Dover Publications.
- Jébrak, M., & Marcoux, E. (2008). *Géologie des ressources minérales*. Ministère des ressources naturelles et de la faune.

- Kaise, C. (2002). Petite histoire d’Onoz. In *Vivre à Onoz*.
- Lyle, J. T. (1994). *Regenerative design for sustainable development*. John Wiley.
- Patrice Doat, A., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. Éditions Alternatives et Parallèles. <http://archive.org/details/ConstruireEnTerre>
- Taymans, J., Launoy, S., & Mahy, G. (2006). Étude du réseau écologique dans le cadre du Plan Communal de Développement de la Nature de la commune de Gembloux.
- Thomas, F. (2013). Exploitation minière au Sud : Enjeux et conflits. *Centre tricontinental*. <https://www.cetri.be/Exploitation-mini%C3%A8re-au-Sud-enjeux>
- Toussaint, J. (1975). *Le bassin de l’Orneau : Contribution à une étude géographique, historique et archéologique*. Les Éditions de l’Orneau.
- Word Economic Forum, & McKinsey. (2024). Why a circular built environment makes economic and environmental sense? *Reuters*. https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/comment-why-circular-built-environment-makes-economic-environmental-sense-2024-02-23/?utm_
- Yans, J. (2017). Gestion durable des ressources minérales en Wallonie (Belgique): Singularités et pistes de réflexion. In A. Rouleau & D. Gasquet (Éds.), *L’industrie minière et le développement durable* (pp. 99–114). CERM, Université du Québec.

RAPPORTS ET DOCUMENTS OFFICIELS

- ADEME. (2022, décembre). *L’écologie industrielle et territoriale*. La librairie ADEME. <https://librairie.ademe.fr/industrie-et-production-durable/5990-l-ecologie-industrielle-et-territoriale-9791029720529.html>
- A.G.W. (2002). *Législation: Carrières et décret sur les carrières*. <https://environnement.wallonie.be/legis/solsoussol/car010.htm>
- CGDD. (2025). *Gestion et utilisation des ressources: Un enjeu majeur*. Notre-environnement. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-utilisation-des-ressources-naturelles-ressources/article/les-consequences-de-l-utilisation-des-ressources-naturelles-sur-l-environnement>
- CIM. (2014). Normes et définitions. https://mrmr.cim.org/media/1134/cim_definition-standards_2014_fr.pdf
- Commission européenne. (2012). *EU trade — The EU’s single voice in international trade and economic security*. https://policy.trade.ec.europa.eu/index_en

- DGO 3. (2020). *Service géologique de Wallonie*. <https://geologie.wallonie.be/home/thematiques-sous-sol/exploitations-souterraines/definitions.html>
- European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. <https://circabc.europa.eu/ui/group/6e9b7f79-da96-4a53-956f-e8f62c9d7fed/library/37e8e207-6222-4212-ad7c-e809e64df72c>
- Fediex. (2020). *Fediex, fédération de l'industrie extractive en Belgique*. <https://www.fediex.be/>
- Gouvernement belge.
(2012). *Mining*. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/dsd/dsd_aofw_ni/ni_pdfs/NationalReports/belgium/Mining.pdf
- IWEPS. (2024). *WALSTAT - Portail d'infos statistiques locales sur la Wallonie*. <http://walstat.iweps.Be/>
- Ineris. (2023, juin). *Héritage minier : Post-exploitation, nouveaux usages et reconversion du sous-sol*.
- Le Forem. (2024). *Industries extractives, produits minéraux, verre et béton*. <https://www.leforem.be/infos-metiers/secteurs/industries-extractives-produits-mineraux-verre-et-beton.html>
- Natagora. (2024). *Visite de la réserve des 3 viviers — Natagora Hesbaye Ouest*. <https://hesbayeouest.natagora.be/nosreserves/sources-du-poncia-et-argiliere-de-grand-manil-1/visite-de-la-reserve>
- PNUE. (2009). *UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unep.org/>
- Projet Interreg DIADeM. (2023). *Contrat de Rivière Sambre et Affluents (CRSA)*. <https://www.interregdiadem.eu/consortium/partenaires-associes/contrat-de-riviere-sambre-et-affluents-crsa/contrat-de-riviere-sambre-et-affluents-crsa,20865,34842.html>
- Service public de Wallonie. (2025, juillet 15). *État de la situation de sécheresse en Wallonie*. <https://www.wallonie.be/fr/actualites/quel-est-letat-de-la-secheresse-en-wallonie>
- SGIB. (2020). *La biodiversité en Wallonie Site de Grand Intérêt Biologique*. <https://biodiversite.wallonie.be/home.html>
- SPW. (1989). *Lois coordonnées sur les mines, minières et carrières*. <https://wallex.wallonie.be/contents/acts/9/9220/1.html>

- SPW. (2002). *Décret sur les carrières*. <https://wallex.wallonie.be/contents/acts/0/26/2.html>
- SPW. (2025, mai 14). *Apply for a permit to exploit mine gas exclusively*. <https://wallonie.be/en/demarches/apply-permit-exploit-mine-gas-exclusively>
- Statbel. (2024). *Building permits*. <https://statbel.fgov.be/en/themes/housing/building-permits>
- USGS. (2008). *Open-File Report*.
- WalOnMap. (S. d.). « Thermo et ilots » : La télédétection au service de l'énergie [Géoportail de la Wallonie]. <https://geoportail.wallonie.be/home/communaute-geomatique/agenda/bc-agenda/geoportail-de-la-wallonie---agenda/thermo-et-ilots--la-teledetection-au-service-de-lenergie.html>

PRÉSENTATIONS ET CONFÉRENCES

- 2e échevine JEM. (2025). *Jemeppe-sur-Sambre: Aménagement du territoire et urbanisation* [Présentation].
- Ridley, C. (2024, janvier 7). The impact of quarrying: Cause and effect [Blog post]. The Organic & Natural Paint Co. <https://organicnaturalpaint.co.uk/blogs/the-impact-of-quarrying-cause-and-effect/>
- Ritimo. (2023, juillet 3). *Post-extractive futures: A living encounter for transformation* [Conférence]. <https://www.ritimo.org/Post-Extractive-Futures-A-Living-Encounter-for-Transformation>

TFE / THÈSES / MANUSCRIT

- Paulus, J. (2015). *Construction en terre crue: Dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique: Ouagadougou* (Mémoire). Université de Liège. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/2355>
- Poty, E., & Chevalier, E. (2006). *Inventaire des ressources du sous-sol et perspectives des besoins à terme des carrières de Wallonie* (Mémoire). Université de Liège.
- Yans, J. (2015). *L'exploitation des ressources non renouvelables du sous-sol dans une perspective de développement durable: La vision du géologue*

transdisciplinaire (Thèse). https://cidd2015.sciencesconf.org/51469/Yans_manuscrit_LLN_DD_2015.pdf

AUTRES SOURCES (WEB, CARTES, BLOGS, ETC.)

- Bruxelles Environnement. (2025, avril 3). Îlot de chaleur. [https://environnement.brussels/citoyen/outils-et-donnees/etat-des lieux-de-lenvironnement/ilot-de-chaleur](https://environnement.brussels/citoyen/outils-et-donnees/etat-des-lieux-de-lenvironnement/ilot-de-chaleur)
- Cummins. (2025). Types de méthodes d'exploitation minière. Cummins Inc. <https://www.cummins.com/fr-ca/engines/mining/types-of-mining>
- Delcambre, B., & Pingot, J. (2008). *Notice explicative 47/1-2 Fleurus–Spy*.
- Delcambre, B., & Pingot, J.-L. (2002). *Carte géologique de Wallonie 40/5-6 Chastre–Gembloux* [Carte]. <https://geologie.wallonie.be/home/acquisition-de-donnees/telechargements/planches-scannees.html>
- Delory, L. (2023, août 23). Le marbre noir de Mazy vaut de l'or. <https://www.canalzoom.be/actu/le-marbre-noir-tresor-du-sous-sol-gembloutois/13111>
- Deluzarche, C. (2021, avril). Roche, minerais, minéral: Quelle différence? *Futura*. Br
- Dequincey, O. (2022). Le sol, les sols. *Planet-Terre*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/FEL2022.xml>
- Fleurent, L. (2020). Ma Palette. <https://ma-palette.fr/lexique/>
- Gilles, J.-M. (2018, juin 2). Gembloux est et a été [Blog]. <http://gembloux.wordpress.com>
- Gulinck, M. (1958). ATLAS DE BELGIQUE (PLANCHE 39) CARRIÈRES. <https://www.atlas-belgique.be/index.php/fr/atlas-papier/2e-atlas-de-belgique/>
- Jottrand, E. (2025). Histoire et Palmarès | Golf et Hôtel de Falnuée. <https://www.golf-hotel-falnuee.com/histoiredugolf>
- Lima, J. (2011). Glaceries de Franière (Belgique) — L'histoire de Chantereine, et des usines verrières de Saint-Gobain. <http://www.daniel-debeaume.com/album-1925287.html>
- Makinson, L. (2024). L'exploitation des carrières et des mines est-elle bonne ou mauvaise pour l'environnement? <https://www.armstrongsgroup.com/is-quarrying-and-mining-good-or-bad-for-the-environment/>

- Maréchal, L. (2013). The extractive sector. *BIODEV2030*. <https://www.biodev2030.org/en/secteur/extractif/>
- MMT. (2023, juin 13). The four types of mining. *Mining and Minerals Today*. <https://m-mtoday.com/news/4-types-of-mining/>
- Normandie, D. (2021, novembre 19). La notion de carrière. DREAL Normandie. <https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/la-notion-de-carriere-a4301.html>
- Oqaidi, K. (2019). *Règles de formulation d'éléments en terre crue*.
- Pacyna, D., & Denayer, J. (2010). Mines, minières et carrières souterraines en Wallonie: Risques associés et contraintes.
- Poseidon EAS asbl Mons. (2015). Carrière de Ligny, Belgique, dive site information. <https://www.divers-guide.com/en/carriere-de-ligny>
- Poskin, E. (2010). Activités extractives en Wallonie : Une coordination nécessaire. https://rhizome.etopia.be/Default/doc/SYRACUSE_ARCHIVES/71200/activites-extractives-en-wallonie-une-coordination-necessaire
- Prevot, P. (2014). Du moulin de Fleurus... aux moulins de sulfate de baryte. <http://fleurusouvenirs.be/pdf/Du-moulin-de-Fleurus-aux-moulins-a-sulfate-de-baryte-V10R003.pdf>
- Sersiron, N., & Delobel, R. (2015, décembre 31). Construire un monde post-extractiviste, post consumériste. *CADTM*. <https://www.cadtm.org/Construire-un-monde-post>
- Tchorski. (2020). Urbex Belgique—Le marbre noir de Mazy. <https://tchorski.fr/3/1596.htm>
- Triest, F. (2012). *Commission Justice & Paix—Belgique francophone*. <https://www.justicepaix.be/>
- Tvbuonair. (2018). *Diagnostic et enjeux du bassin transfrontalier de la Sambre*. https://www.tvbuonair.eu/doc/TVBuONAIR_DIAGNOSTIC.pdf
- Varin, F. (2011). L'architecture vernaculaire : Une définition difficile à cerner. <https://www.icomos.org/public/publications/vernacular2.pdf>
- Vincent, J., & Lamoureux, J. (2024, avril). Introduction au lexique des matériaux. *Ordre des architectes*. <https://www.architectes.org/introduction-au-lexique-des-materiaux-90477>

- Walterre. (2018). Walterre – Valorisation certifiée des terres excavées. <https://walterre.be/>

Liste des figures

<i>Figure 1. Extraction mondiale de matières premières depuis 1900 et projection 2050. Crédits : Source : Krausmann et al., 2018.</i>	8
<i>Figure 2. Le Bassin versant de la Sambre. Crédit : CRSA, Projet Interreg DIADeM</i>	11
<i>Figure 3. Classification des ressources minérales en fonction de l'utilisation du produit. Crédit :source Jébrak & Marcoux, (2008)</i>	16
<i>Figure 4. Principales ressources minérales employés pour la construction et l'aménagement d'une maison d'habitation standard. Crédit : Jébrak & Marcoux, (2008).</i>	19
<i>Figure 5. Répartition mondiale des réserves de substance minérales. Crédit : BRGM (2024)</i>	20
<i>Figure 6. Variétés des techniques d'exploitation du sous sol. Crédit : Ineris (2023)</i>	22
<i>Figure 7. Sources de pollution et voies de transfert de polluants en contexte minier. Crédit : Ineris 2023</i>	31
<i>Figure 8. Les différents horizons d'un profil de sol. Crédit : Wilsonbiggs 2023</i>	38
<i>Figure 9. Les composants solides de la terre crue. Crédit : Fontaine et al., 2009, p. 102</i>	39
<i>Figure 10. Architecture de terre dans le monde. Crédit : CRA Terre. Org</i>	40
<i>Figure 11. "Roue" des techniques de construction en terre. Crédit : CRA Terre. Org</i>	43
<i>Figure 12. Procédé de fabrication de blocs de terre comprimée (BTC). Crédit : Pauline Sémon (2016)</i>	44
<i>Figure 13. Procédé de réalisation du pisé. Crédit : Pauline Sémon (2016)</i>	44
<i>Figure 14. Procédé de réalisation de mur en Bauge. Crédit : Pauline Sémon (2016)</i>	45
<i>Figure 15. Procédé de réalisation de mur en Adobe. Crédit : Pauline Sémon (2016)</i>	45
<i>Figure 16 . Procédé de réalisation de mur en Torchis. Crédit : Pauline Sémon (2016)</i>	46
<i>Figure 17. Mécanismes de stabilisation. Crédit : Guillaud & Houben, 1995 : p. 81</i>	48
<i>Figure 18. Situation géographique du sous bassin versant de l'Orneau. Crédit : Djike Daniel (2025)</i>	55
<i>Figure 19. Sites d'extraction du sous-bassin versant de l'Orneau. Crédit : Groupe projet (2025)</i>	56
<i>Figure 20. Construction ancienne à partir de ressources locales. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	58
<i>Figure 21. Diversité des ressources extraite du sous-sol. Crédit : Groupe projet (2025)</i>	59
<i>Figure 22. Diversité des ressources extraite du sol. Crédit : Groupe projet (2025)</i>	60

<i>Figure 23. Site d'extraction superficielle à ciel ouvert de sable. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	61
<i>Figure 24. Site d'extraction superficielle à ciel ouvert d'argile et de schiste. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	61
<i>Figure 25. Ancienne sablière de la Sauvenière. Crédit : Gilles (2024)</i>	62
<i>Figure 26. Ancienne sablière du Grand Leez. Crédit : Inconnu (2024)</i>	63
<i>Figure 27. Ancienne argilière de Grand Manil . Crédit : TRADECOWALL (2023)</i>	63
<i>Figure 28. Site d'extraction Profonde à ciel ouvert de calcaire. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	64
<i>Figure 29. Ancienne carrière de calcaire de Vaux. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	65
<i>Figure 30. Ancienne carrière de petit granit de Ligny. Crédit : inconnu (2025)</i>	66
<i>Figure 31. Site d'extraction Profonde souterraine. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	67
<i>Figure 32. Phénomène d'affaissement progressif après exploitation souterraine. Crédit : Ineris (2023)</i>	67
<i>Figure 33. Carrière inondée. Crédit : Tchorski, (2020)</i>	68
<i>Figure 34. Carrière de Golzinne, encore en activité. Crédit : d'après Tchorski (2020), adaptée par Aliciance Paoli 2025)</i>	68
<i>Figure 35. Ancien four a chaux près du château de Balâtre. Crédit : Georges Durieux (2015)</i>	69
<i>Figure 36. Ancien atelier de taille de marbre noir de Mazy. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	70
<i>Figure 37. Ancien Chemin de fer près de Golzinne. Crédit : Inconnu, Sd</i>	70
<i>Figure 38. Ancienne carrière de Vaux ayant servi à la construction du Chateau de Mielmont au XIIe. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	71
<i>Figure 39. Traces résultantes de l'activité extractive. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	73
<i>Figure 40. Terrain de golf du château de Falnuée inondé par l'Orneau en juillet 2021. Crédit : Éric Jottrand (2021)</i>	74
<i>Figure 41. Potentiels d'interaction entre les carrières et les enjeux hydriques. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	75
<i>Figure 42. AVANT/ APRES de l'ancienne argilière de Grand-Manil. Crédit : TRADECOWALL (2023)</i>	76
<i>Figure 43. Potentiels d'interaction entre les carrières et la biodiversité fragmentée. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	77
<i>Figure 44. Croissance démographique par commune. Crédit : d'après Statbel (2024), adaptée par Daniel Djike (2025)</i>	78

<i>Figure 45. Division administrative des communes du sous-bassin versant de l'Orneau.</i>	
<i>Crédit : d'après IWEPS sd, adaptée par Daniel Djike (2025)</i>	79
<i>Figure 46. Comparaison des permis délivrés pour constructions neuves et rénovations selon les communes. Crédit : d'après Statbel (2024), adaptée par Daniel Djike (2025)</i>	80
<i>Figure 47. Localisation du territoire d'étude. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	81
<i>Figure 48. Zone d'intervention. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	83
<i>Figure 49. Ressources du sous-sol de la zone d'étude. Crédit : d'après Delcambre (2002), adaptée par Daniel Djike (2025)</i>	85
<i>Figure 50. Ressource du sol de la zone d'étude. Crédit : d'après Delcambre (2002), adaptée par Daniel Djike (2025)</i>	86
<i>Figure 51. La Carrière de Ligny-Plage. Crédit : EAS asbl (2015)</i>	87
<i>Figure 52. La Carrière Vivaqua. Crédit : EAS asbl (2020)</i>	87
<i>Figure 53. Projection des nouveaux sites d'extraction d'ici 2050 en fonction du sous sol. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	89
<i>Figure 54. Nouveaux sites d'extraction proposés d'ici 2050 en rapport avec la biodiversité. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	90
<i>Figure 55. Phase d'exploitation d'une ancienne et nouvelle carrière de calcaire. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	92
<i>Figure 56. Phase d'exploitation d'une ancienne et nouvelle carrière de calcaire. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	93
<i>Figure 57. Illustration du profil thermique caractéristique d'un îlot de chaleur urbain. Crédit: Akbari et al. (1992)</i>	95
<i>Figure 58. Ilot de chaleur à Bruxelles : cartographie des températures moyennes durant les mois d'été de la période 1987-2016. Crédit : VITO (2018)</i>	95
<i>Figure 59. Ilot de chaleur à Fleurus, Augmentation de la température en fonction de la densité d'habitation. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	96
<i>Figure 60. Aléa d'inondation et zone inondées en 2021. Crédit : Aliciane Paoli (2025)</i>	97
<i>Figure 61. Superposition des risques ilot de chaleur et inondation. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	98
<i>Figure 62. Site d'intervention. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	99
<i>Figure 63. Ressources du sous sol de la micro-extraction. Crédit : Delcambre (2002)</i>	100
<i>Figure 64. Ressources du sol de la micro-extraction. Crédit : Delcambre (2002)</i>	101
<i>Figure 65. Organisation spatiale et éléments du territoire existant. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	102

<i>Figure 66. Les horizons du sol. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	103
<i>Figure 67. Dynamique d'extraction de geosourcé. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	104
<i>Figure 68. Gestion des ilots de chaleurs. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	106
<i>Figure 69. Gestion des ruissellements et des inondations. Crédits : Daniel Djike (2025)</i>	108
<i>Figure 70. Cycle de vie de la terre crue. Crédit : Anger et Fontaine (2009)</i>	109
<i>Figure 71. Sites de collecte de matière et parcours des ressources de nos scénarios. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	111
<i>Figure 72. Les usages des matériaux extraits. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	113
<i>Figure 73. Formation pédologique et site d'extraction des scenarios. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	114
<i>Figure 74. Profil pédologique du chantier de construction au Sart Tilman. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	114
<i>Figure 75. Test granulométrique à la bouteille. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	115
<i>Figure 76. Test d'enduit en terre crue. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	116
<i>Figure 77. Test d'enduit de Terre + chaux + sable + fibre de miscanthus avec ajout de colorant. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	117
<i>Figure 78. Test de briques. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	117
<i>Figure 79. Résultat des tests d'enduits. Crédit : Daniel Djike (2025)</i>	118