

# Rapport Final — E.2.5

Soutien à la démarche d'un quartier exemplaire vers le  
zéro net carbone de bluefactory



Climate  
services

11. AOÛT 2025

Climate Services SA

Écrit par : Schulz / Halter



# Contents

|        |                                                                            |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | Description du projet .....                                                | 2  |
| 2.     | Vue d'ensemble des outils .....                                            | 3  |
| 2.1.   | Plateforme CO <sub>2</sub> pour bilan d'exploitation.....                  | 4  |
| 2.2.   | Outils pour objectifs et plan d'action.....                                | 5  |
| 2.3.   | Outil bilan simplifié .....                                                | 6  |
| 2.4.   | Outil pour aménagement extérieur.....                                      | 7  |
| 2.5.   | Outils pour construction en bâtiment.....                                  | 8  |
| 2.5.1. | Outil Lesosai.....                                                         | 8  |
| 2.5.2. | Outil Simplibat de la HEIA-FR.....                                         | 8  |
| 2.5.3. | Benchmark SIA.....                                                         | 9  |
| 3.     | Présentation des résultats consolidés .....                                | 9  |
| 4.     | Présentation des estimations carbone des constructions futures.....        | 10 |
| 4.1.   | Contexte et limites de l'analyses .....                                    | 10 |
| 4.2.   | Scénarios étudiés .....                                                    | 11 |
| 4.3.   | Analyses des résultats.....                                                | 12 |
| 4.4.   | Observations et réflexions .....                                           | 14 |
| 5.     | Défis de la gestion carbone holistique d'un quartier .....                 | 14 |
| 5.1.   | Difficultés dans la récolte des données.....                               | 14 |
| 5.2.   | Temporalités différentes des bilans.....                                   | 15 |
| 5.3.   | Mise à jour des facteurs d'émission.....                                   | 16 |
| 5.4.   | Comparaison entre bilans estimatifs, bilans fictifs et bilans actuels..... | 16 |
| 6.     | Conclusion et prochaines étapes .....                                      | 17 |

## Rapport Final — E.2.5

# Soutien à la démarche d'un quartier exemplaire vers le zéro net carbone de bluefactory

### 1. Description du projet

Dans le cadre du Plan Climat cantonal, et plus précisément de la mesure E.2.5, subventionnée par le canton de Fribourg et portée par Bluefactory Fribourg Freiburg (BFF SA). Climate Service SA ainsi que d'autres entreprises partenaires ont été mandatées pour apporter leurs compétences spécifiques dans le développement d'outils d'analyse climatique.

Le projet réalisé entre 2022 et 2026, a comme objectif général de :

- (1) Mettre en place une méthodologie assurant une planification cohérente et holistique d'un quartier
- (2) Développement d'une suite d'outils permettant une planification CO<sub>2</sub> de tout quartier ou développement urbain jusqu'à la mise en œuvre et le monitoring incluant une visualisation d'exécution (énergie grise et mobilité) et un suivi d'indicateurs.
- (3) Planification du suivi carbone (en parallèle du suivi financier) dans les phases projet.
- (4) Développement d'un concept de plan mobilité dynamique intégrant les évolutions possibles du quartier à l'intérieur comme à l'extérieur du quartier.

Les points 1 et 3 ont été principalement portés par Climate Services SA, tandis que les points 2 et 4 a été réalisé en collaboration avec la HEIA-FR.

Les outils développés et testés dans le cadre de ce projet permettent de calculer les émissions d'exploitation, celles liées à la mobilité sur le site, ainsi que les énergies grises associées aux constructions. Ils offrent également la possibilité d'estimer et de planifier les émissions futures sur une base comparative, afin de servir de support décisionnel pour les choix constructifs en cours et à venir, ainsi que pour les stratégies de décarbonation du bilan d'exploitation.

Ces outils contribuent directement à l'atteinte des objectifs (2) et (3) du projet. En effet, l'enjeu principal est d'identifier les aspects les plus émissifs du site ainsi que de répondre à la question de savoir si les efforts entrepris ont permis une réduction significative des émissions par rapport à une construction de bâtiment plus conventionnelle.

Afin de répondre à l'objectif (1), un concept final de visualisation des données a été développé et proposé à l'équipe de BFF SA. Celui-ci permet de représenter de manière cohérente et holistique l'ensemble des résultats issus des différents outils carbone du site. Cette représentation peut être assimilée à un cockpit carbone du quartier.

## 2. Vue d'ensemble des outils

Une suite d'outils a été développée dans le cadre du projet. Ces outils répondent aux différents besoins liés à l'analyse holistique d'un quartier en cours de développement. Afin d'assurer une telle planification, il est nécessaire de disposer d'outils permettant, dans un premier temps, des estimations globales, notamment pour anticiper les émissions futures liées aux constructions et à l'exploitation. Dans un second temps, des analyses plus détaillées doivent être possibles, par exemple sur les matériaux utilisés dans les constructions ainsi que sur les émissions réelles générées par les utilisateurs du site.

Par ailleurs, des outils de visualisation sont requis afin d'identifier les optimisations carbone potentielles et de suivre l'évolution des émissions dans le temps. Enfin, l'établissement d'un budget carbone est nécessaire pour encadrer l'ensemble de ces bilans.

D'une part, les émissions liées à l'exploitation. Donc celles générées par les utilisateurs du site, soit les entreprises actives ainsi que les personnes qui y travaillent, en particulier à travers leurs activités de mobilité. Les bilans d'exploitation (ou bilans carbone) offrent une vue d'ensemble des émissions générées annuellement par ces utilisateurs sur le site.

D'autre part, les émissions des constructions réalisées sur le site constituent une seconde source d'émissions. Elles se déclinent en deux catégories : la construction de bâtiments et les aménagements extérieurs.

Le tableau ci-dessous détaille les différents outils disponibles pour l'analyse de ces différents aspects :

Tableau 1 - Vue d'ensemble des outils

|                                          | Construction de Bâtiment             | Construction de Aménagement extérieur | Exploitation du site   | Mobilité              |
|------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Estimation grossière                     | Simplibat HEIAFR                     | CS-Construction                       | CS-Bilan simplifié     | CS-Bilan simplifié    |
| Estimation affinée                       | Simplibat HEIAFR<br>Lesosai Ecobilan | CS-Construction                       | Plateforme CO2 CS      | Plateforme CO2 CS     |
| Optimisations et évolutions dans le temp | Outil plan d'action CS               | CS-Construction                       | Outil plan d'action CS | Outil mobilité HEIAFR |
| Budget Carbone                           | Benchmark SIA                        |                                       | Outil budget CS        | Outil mobilité HEIAFR |

## 2.1. Plateforme CO<sub>2</sub> pour bilan d'exploitation

La plateforme CO<sub>2</sub> est une application en ligne utilisée pour réaliser le bilan d'exploitation du site de bluefactory. Il s'agit d'un outil développé en dehors du cadre de ce projet.

Elle a permis, dans une large mesure, à BFF SA d'établir ses bilans d'exploitation annuels, en intégrant notamment des aspects tels que le chauffage ou la mobilité pendulaire, qui génèrent des émissions sur le site. Les résultats de ces bilans CO<sub>2</sub> sont présentés dans la section dédiée.

Les résultats sont ensuite exportables en format Excel. Un outil Excel est utilisé pour générer le rapport détaillé du bilan carbone et le passer en format de présentation.

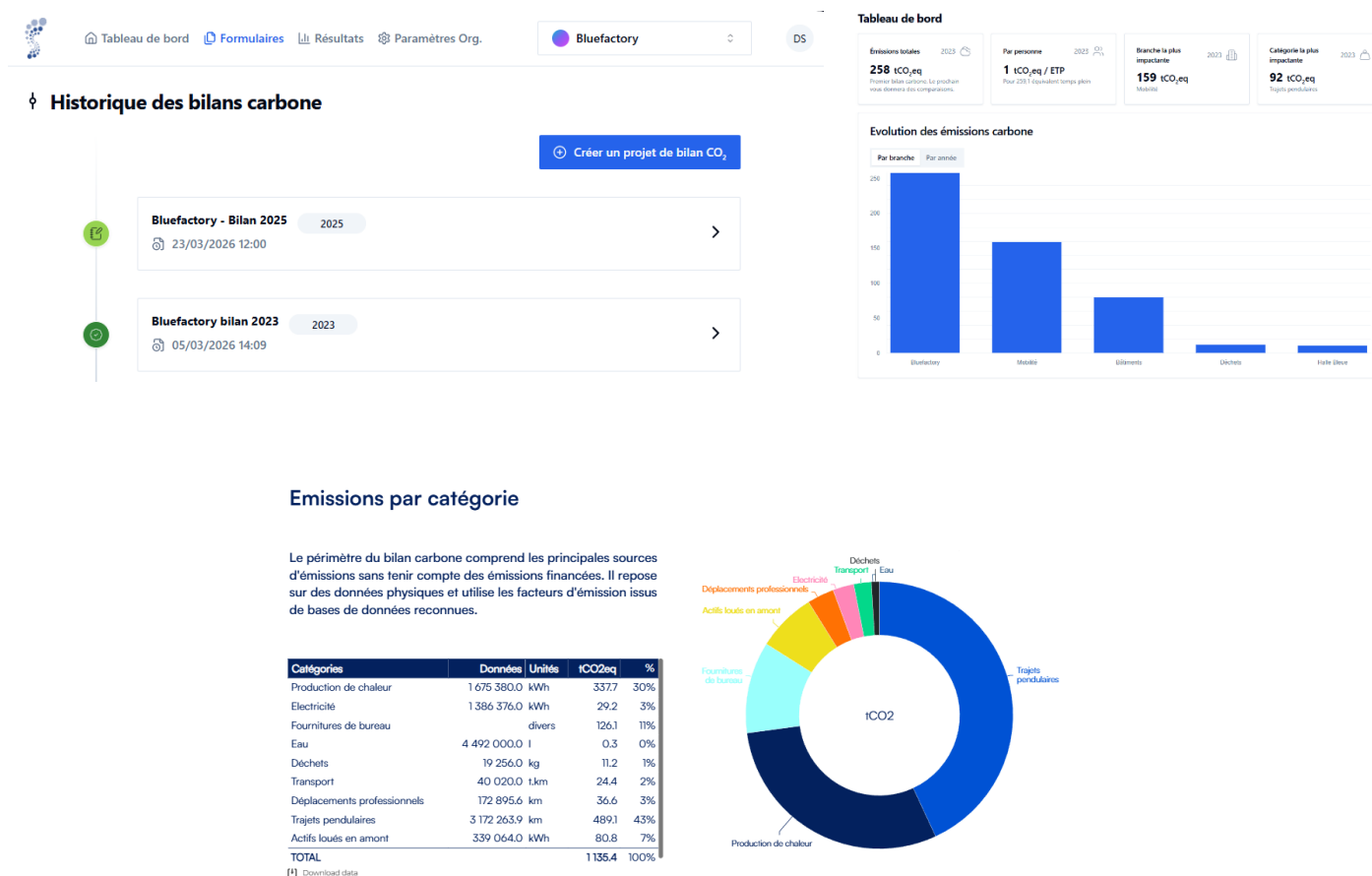


Figure 1 - Captures d'écrans de la plateforme CO<sub>2</sub>



## 2.2. Outils pour objectifs et plan d'action

Les outils dédiés à la définition des objectifs CO<sub>2</sub> et à l'élaboration de plans d'action ont été développés par Climate Services et existent actuellement principalement sous forme de fichiers Excel. Initialement conçus en interne, ils ont été utilisés et adaptés dans le cadre du Plan Climat afin de structurer la démarche de réduction des émissions.

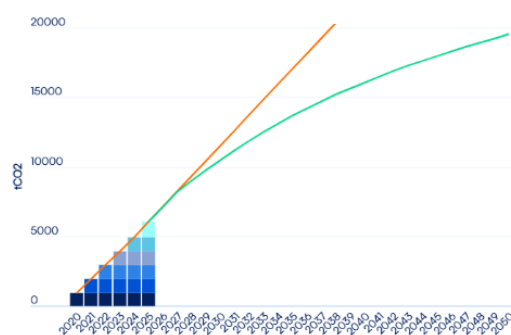
Ces outils permettent de définir des trajectoires de réduction cohérentes, en s'appuyant sur différentes méthodologies reconnues, notamment les approches de la Science Based Targets initiative (SBTi) ou encore la méthode ACB basée sur les budgets carbone. Les objectifs ACB permettent une comparaison par rapport à des bilans similaires moyens, offrant ainsi un point de référence pour évaluer la performance carbone du projet.

Un élément central de ces outils est la notion de budget carbone, qui correspond à une quantité maximale d'émissions de CO<sub>2</sub> (ou CO<sub>2</sub> équivalent) à ne pas dépasser sur une période donnée afin de rester aligné avec des objectifs climatiques définis. Sur cette base, les outils permettent de comparer les émissions projetées avec ce budget et d'identifier les écarts.

Enfin, la planification des mesures permet de créer la trajectoire de réduction, en structurant les actions dans le temps et en facilitant le passage du diagnostic carbone à la mise en œuvre opérationnelle. Ces outils constituent ainsi un lien direct entre la définition des objectifs et le pilotage concret des stratégies de décarbonation.

### Climate Services Carbon Monitor

#### Evolution des émissions depuis 2020



|                                              |                                              |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| BILAN CARBONE 2020<br>979 tCO <sub>2</sub>   | BILAN CARBONE 2021<br>1 037 tCO <sub>2</sub> |
| BILAN CARBONE 2022<br>1 009 tCO <sub>2</sub> | BILAN CARBONE 2023<br>943 tCO <sub>2</sub>   |
| BILAN CARBONE 2024<br>1 006 tCO <sub>2</sub> | BILAN CARBONE 2025<br>1 135 tCO <sub>2</sub> |

■ Emissions annuelles et cumulées  
— Evolution simulée des émissions cumulées de CO<sub>2</sub> sur la base du plan d'action établi  
— Evolution simulée des émissions cumulées de CO<sub>2</sub> sans mesures

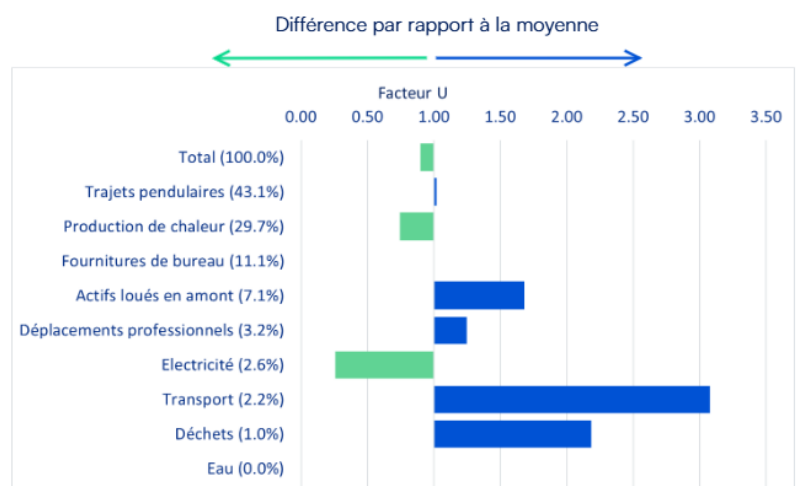


Figure 2 Captures d'écrans des rapports objectifs et plan d'action

## 2.3. Outil bilan simplifié des entreprises

Le bilan simplifié est un outil en phase de test, également développé par Climate Services, destiné à la gestion du site. Il vise notamment à estimer les bilans CO<sub>2</sub> d'entreprises hypothétiques amenées à s'implanter à l'avenir.

Il permet ainsi de produire une estimation rapide des émissions pour des entreprises non encore présentes sur le site, afin d'anticiper leur contribution au bilan d'exploitation global.

L'outil repose sur la saisie d'un nombre limité de paramètres et sur l'utilisation de données statistiques pour établir un bilan carbone simplifié. Parmi les informations requises figurent notamment le nombre d'employés, la surface chauffée, ainsi que des éléments clés relatifs au système de chauffage, à l'âge du bâtiment et à la consommation électrique estimée.

L'utilisateur peut ensuite compléter l'analyse avec des valeurs estimées concernant les trajets pendulaires, les repas, les déchets, ainsi que la sous-traitance et les consommables dans le cas d'activités de production.

Ce bilan simplifié offre ainsi un ordre de grandeur des émissions potentielles, utile tant pour les entreprises déjà présentes que pour celles qui pourraient occuper les futurs espaces, et permet d'anticiper leur impact sur le bilan d'exploitation du site.

| EMS Exemple - Bilan CO2 2024                 |               |       |       |
|----------------------------------------------|---------------|-------|-------|
| Emission CO2                                 | tCO2          | %     | Scope |
| Chauffage                                    | 418.1         | 61.9% | 1     |
| Electricité                                  | 1.3           | 0.2%  | 2     |
| <b>Mobilité des personnes</b>                |               |       |       |
| Mobilité pendulaire                          | 65.7          | 9.7%  | 3     |
| Mobilité professionnelle voiture privées     | 14.0          | 2.1%  | 3     |
| Mobilité professionnelle voiture entreprises | 0.0           | 0.0%  | 1     |
| Mobilité professionnelle transports publics  | 0.2           | 0.0%  | 3     |
| <b>Transport marchandises</b>                |               |       |       |
| Transport véhicules d'entreprise             | 0.0           | 0.0%  | 1     |
| Transport sous-traité                        | 0.0           | 0.0%  | 3     |
| Repas                                        | 100.5         | 14.9% | 3     |
| Déchets                                      | 9.5           | 1.4%  | 3     |
| Sous-Traitance                               | 27.4          | 4.1%  | 3     |
| Consommables                                 | 38.0          | 5.6%  | 3     |
| Eau                                          | 0.2           | 0.0%  | 3     |
| <b>Total</b>                                 | <b>674.98</b> |       |       |

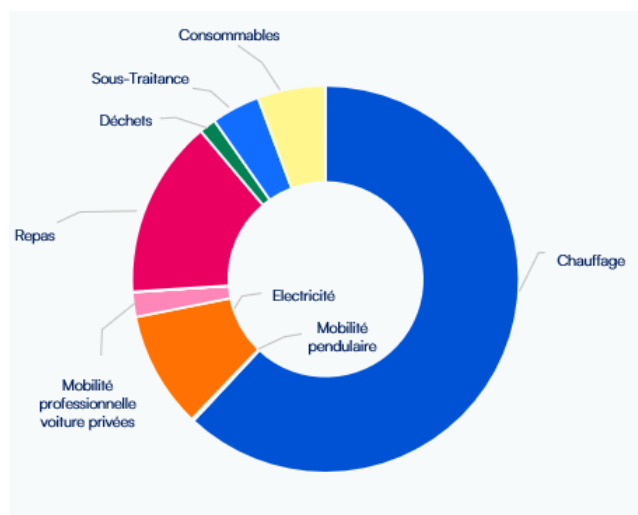


Figure 3 Captures d'écran d'un rapport simplifié

## 2.4. Outil pour aménagement extérieur

Un outil spécifique a été développé pour estimer les émissions liées aux aménagements extérieurs, à partir d'une description des travaux, réelle ou planifiés. Avant d'arriver à la version finale de l'outil, plusieurs versions antérieures ont été testées sur des infrastructures routières.

Contrairement à de nombreux outils d'analyse carbone, souvent spécialisés et cloisonnés, celui-ci repose sur une approche accessible et transversale, facilitant la compréhension et la communication des résultats entre les différents acteurs du projet, y compris les non-spécialistes. Conçu comme un outil d'aide à la décision, il permet de quantifier les émissions à chaque étape du chantier et d'identifier des leviers d'optimisation concrets.

L'évaluation repose sur une structuration des émissions en grandes catégories (fournitures, activités de chantier, logistique, paysagisme) et sur l'utilisation de facteurs d'émission reconnus, tels que ceux de la KBOB ou Ecoinvent. Grâce à sa flexibilité, l'outil peut être utilisé à différents stades du projet et s'adapter à l'évolution des données, permettant un affinement progressif des estimations.

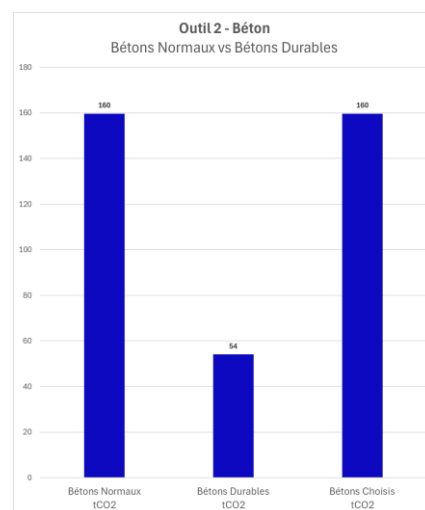
L'outil permet aussi de faire différents scénarios pour comparer l'utilisation de diverses compositions de bétons, une flotte de véhicule plus optimisée et aussi la gestion des activités de chantier. De plus, l'outil offre une estimation grossière du potentiel de captation carbone des éléments de paysagisme (sols et arbres).

| Catégorie         | Sous-catégories           | Type d'émissions      |
|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| Fournitures       | Matières premières        | Emissions Ponctuelles |
|                   | Matériaux préfabriqués    |                       |
|                   | Fournitures divers        |                       |
| Activité Chantier | Machine de surface (m2)   |                       |
|                   | Machine de volume (m3)    |                       |
|                   | Machine spéciale (m)      |                       |
| Logistique        | Transport en décharge     | Emissions Temporelles |
|                   | Transport intermédiaire   |                       |
|                   | Transport au dépôt        |                       |
|                   | Transport des fournitures |                       |
| Paysagisme        | De végétaux               | Emissions Temporelles |

Figure 4 - Methodologie de l'outil aménagement extérieur

| Résultats Compacts        |      |     |
|---------------------------|------|-----|
| Catégorie                 | tCO2 | C % |
| C1 - Fournitures          | 188  | 77% |
| C2 - Activité de chantier | 38   | 16% |
| C3 - Logistique           | 17   | 7%  |
| Total                     | 244  |     |

Figure 5 - Captures d'écrans du rapport des aménagements extérieur





## 2.5. Outils pour construction des bâtiments

### 2.5.1. Outil Lesosai

L'outil écobilan de Lesosai est initialement conçu pour l'optimisation énergétique des bâtiments, notamment pour l'analyse des besoins en chauffage, le dimensionnement des systèmes techniques et l'évaluation de la performance énergétique.

Dans le cadre de ce projet, il est utilisé de manière complémentaire afin d'estimer les impacts environnementaux des constructions, en particulier les énergies grises et les émissions associées aux matériaux, apportant ainsi un niveau d'analyse plus détaillé au bilan carbone global.

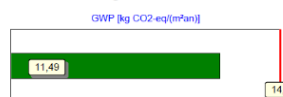
#### Rapport écobilan

Projet : Smart Living Lab  
Auteur du projet : Behnisch Architekten  
Collaborateur en charge du dossier : Samuel Schmidt  
Type de projet : Bâtiment neuf  
Norme : Minergie-P ECO  
Version LCA : Minergie ECO 2023 / KBOB 2009/1:2022 ver 4.0  
Type de calcul LCA : Calcul détaillé  
Indicateur(s) : Énergie primaire non renouvelable (NRE)  
Émissions de gaz à effet de serre (GWP)

#### Evaluation Minergie ECO



#### Evaluation Minergie



#### Paramètres

| Bâtiment                                 |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------|
| Durée de vie                             | 60 ans                      |
| Surface de référence pour calcul LCA     | 4044,8 [m²]                 |
| Prise en compte du coffrage du béton     | Uniquement les bétons armés |
| Répartition des surfaces par affectation |                             |
| 3 Administration                         | 2245,3 [m²]                 |
| 4 (SRE > 500m²)                          | 1799,5 [m²]                 |
| - Locaux non chauffés                    | 300 [m²]                    |

Figure 6 - Capture d'écran d'un rapport écobilan

### 2.5.2. Outil Simplibat de la HEIA-FR

L'outil Simplibat est un outil d'aide à la décision destiné à intégrer les enjeux carbone dès les premières phases de planification d'un bâtiment. Il permet d'analyser, comparer et visualiser différents scénarios de développement afin d'identifier les principaux leviers de réduction des émissions.

L'outil structure l'évaluation carbone tout au long du projet, de la planification initiale jusqu'aux choix de conception plus détaillés, en apportant une lecture claire et exploitable des impacts. Il facilite ainsi une prise de décision éclairée, en mettant en évidence les contributions respectives des différents éléments du projet au bilan carbone global.



#### SimpliBat

Nom du projet: Exemple Date de la simulation: 11/30/2025

Données entrées

| Caractéristiques et volumétrie   |                   |
|----------------------------------|-------------------|
| Catégorie d'ouvrage              | habitat collectif |
| Type de travaux                  | Neuf              |
| Année cible - Bureaux            | 2026              |
| Surface de référence énergétique | 489 m²            |
| Nombre d'étages hors sol         | 2                 |
| Facteur d'enveloppe (A10/A10)    | 1,8               |
| Surface de plancher sous sol     | 11%               |
| Surface de plancher sous sol     | 80 m²             |
| Surface de plancher sous sol     | 1,0               |
| Surface extérieure parking       | 0 m²              |
| Surface extérieure construite 1  | 0 m²              |
| Surface extérieure construite 2  | 0 m²              |

| Système énergétique          |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| Station climatique           | Bern-Lötschli                  |
| Altitude                     | 600                            |
| Système chauffage            | Pompe à chaleur (géothermique) |
| Sondes géothermiques         | m                              |
| Surface PV                   | 170 m²                         |
| Puissance PV installée       | 23,8 kWp                       |
| Part d'auto-consommation     | 11,5%                          |
| Capteurs solaires            | 2 m²                           |
| Indice Minergie/Mogep        | Minergie-P                     |
| Calcul des besoins d'énergie | calcul simplifié               |

| Choix constructifs           |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Sous-sol                     | Talus                                |
| Fondation                    | Superficielle                        |
| Sous-sol                     | Isolée, EPS                          |
| Plan de terrain              |                                      |
| Type de structure            | Béton                                |
| Épaisseur de béton           | 20 cm                                |
| Revêtement extérieur façade  | Croûte extérieure                    |
| Isolation extérieure         | EPS - isolation thermique extérieure |
| Structure du toit            | Isolation en béton 25cm              |
| Couverture du toit           | Tuile plate - isolation EPS          |
| Intérieurs                   |                                      |
| Parois intérieures portantes | Béton 20 cm                          |
| Planchers                    | Isolation en béton 25cm              |
| Extérieurs                   |                                      |
| Revêtement parking           | Revêt. bit. simple                   |
| Revêtement construit 1       | Croûte                               |
| Revêtement construit 2       | Béton                                |

| Objectif visé                                  |                  |
|------------------------------------------------|------------------|
| Cible Limite construction - SIA 380            | 9 kgCO2eq/m² an  |
| Cible Limite exploitation - SIA 380            | 2 kgCO2eq/m² an  |
| Équivalence (constr. + exploitation) - SIA 380 | 11 kgCO2eq/m² an |
| Cible Ambitieux construction - SIA 380         | 6 kgCO2eq/m² an  |
| Cible Ambitieux exploitation - SIA 380         | 1 kgCO2eq/m² an  |
| Énergie grise - construction - SIA 380         | 40 kWh/m² an     |
| Énergie grise - exploitation - SIA 380         | 20 kWh/m² an     |
| Indicateur construction - Minergie             | 15 kgCO2eq/m² an |

Figure 7 - Capture d'écran de l'outil SimpliBat

### 2.5.3. Benchmark SIA

Les benchmarks SIA correspondent à des valeurs de référence en intensité carbone ( $\text{tCO}_2/\text{m}^2$ ) publiées par la Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, notamment dans les normes et cahiers techniques liés à la performance environnementale des bâtiments (par exemple la série SIA 2040 ou 390). Ils définissent des objectifs que les projets de construction doivent viser afin de limiter leur impact climatique.

Ces benchmarks peuvent être mobilisés pour fixer des objectifs carbone pour les futures constructions du quartier, en fournissant une base de référence reconnue et officielle. Ils permettent ainsi d'attribuer un budget carbone cohérent aux projets, en lien avec des standards publiés, et de guider les choix de conception vers des niveaux d'émissions conformes aux exigences actuelles.

## 3. Présentation des résultats consolidés

Les différents outils présentés ont été appliqués sur le site de bluefactory afin de répondre à l'objectif de gestion carbone d'un quartier en constante transformation. Chaque outil produit des résultats  $\text{CO}_2$ , dont les totaux sont consolidés dans une feuille de calcul unique, permettant d'obtenir une vision agrégée des émissions et de générer le graphique présenté dans cette section.

Les résultats consolidés couvrent la période 2015-2025 et regroupent trois grandes catégories : les émissions liées aux bâtiments (énergies grises), les bilans d'exploitation annuels, ainsi que les aménagements extérieurs. Le total cumulé des émissions s'élève à 6652  $\text{tCO}_2\text{eq}$ .

Les émissions associées aux bâtiments représentent la part la plus importante, avec un total de 3233  $\text{tCO}_2\text{eq}$ . Elles incluent notamment la Halle bleue (1016  $\text{tCO}_2\text{eq}$  en 2015), Wood ID (176  $\text{tCO}_2\text{eq}$  en 2022), le Bâtiment B (1852  $\text{tCO}_2\text{eq}$  en 2022) et le projet SLL (1052  $\text{tCO}_2\text{eq}$  en 2025).

Les bilans d'exploitation, calculés annuellement entre 2018 et 2025 via la plateforme  $\text{CO}_2$ , totalisent 2322  $\text{tCO}_2\text{eq}$ . Les valeurs observées varient selon les années, avec un maximum en 2025 (896  $\text{tCO}_2\text{eq}$ ) et un minimum en durant la période COVID en 2020 (129  $\text{tCO}_2\text{eq}$ ), reflétant les fluctuations des activités sur le site, comme pour la mobilité.

Enfin, les aménagements extérieurs sont représentés par le projet de renaturation en 2025, avec 234  $\text{tCO}_2\text{eq}$ .

L'ensemble de ces résultats met en évidence la contribution relative des différentes sources d'émissions au bilan global du site, et constitue une base consolidée pour le suivi et le pilotage des performances carbone à l'échelle du quartier.

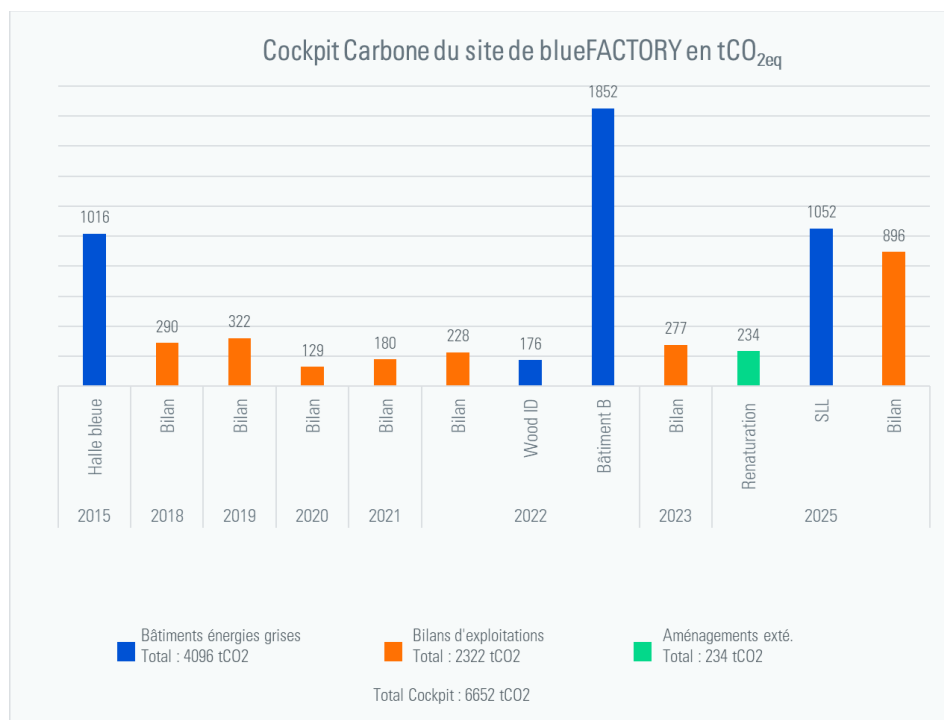


Figure 8 - Cockpit Carbone du site de bluefactory

## 4. Présentation des estimations carbone des constructions futures

### 4.1. Contexte et limites de l'analyses

Le graphique en Figure 9 présente les estimations des émissions de carbone incorporé des bâtiments encore prévus sur le site, exprimées en kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>. Ces données sont basées sur les informations disponibles au printemps 2026.

Il est important de souligner que tous les bâtiments ne se trouvent pas au même stade de planification. Les valeurs présentées doivent donc être interprétées comme des ordres de grandeur permettant d'anticiper les émissions futures du site et de mieux intégrer les impacts des constructions dans les différents bilans carbone jusqu'en 2050.

Les estimations ont été réalisées à l'aide de l'outil SimpliBAT, développé par la HEIA-FR. Cet outil permet d'estimer les émissions de carbone incorporé à partir de paramètres clés tels que :

- le type de construction (nouvelle construction ou rénovation) ;
- le matériau structural principal (béton ou bois) ;
- la surface du bâtiment ;
- le nombre d'étages prévus.

Les informations actuellement disponibles restent préliminaires et pourront évoluer au fur et à mesure de l'avancement des projets. Cette incertitude justifie une approche proactive de la gestion du carbone afin d'optimiser les choix constructifs lorsque davantage d'informations seront

disponibles. Par ailleurs, cette analyse porte uniquement sur les émissions liées à la construction des bâtiments (énergie grise et carbone incorporé). Les émissions liées à l'exploitation des bâtiments ne sont pas incluses dans ce bilan.

Pour des raisons de comparabilité entre les projets, les résultats ont été normalisés sur une durée de vie de référence de 60 ans. Cette approche diffère de la méthode habituelle de la norme SIA 390, qui exprime généralement ses limites en  $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2\text{/an}$  afin de tenir compte des différentes durées de vie des ouvrages.

## 4.2. Scénarios étudiés

Le graphique compare quatre scénarios d'émissions pour les huit bâtiments encore prévus sur le site. Le détail des valeurs est présenté dans le tableau 2.

### Construction standard

La première barre (gris clair) représente un scénario de construction standard. Dans la plupart des cas, ce scénario correspond à une nouvelle construction réalisée principalement en béton. Il constitue une référence permettant d'évaluer le potentiel de réduction des autres options constructives.

### Construction choisie

La deuxième barre (bleu) représente le scénario actuellement envisagé par bluefactory. Celui-ci tient compte des décisions déjà prises concernant les rénovations ainsi que les nouvelles constructions en bois.

Les résultats montrent que ces choix permettent une réduction significative des émissions par rapport au scénario standard. En moyenne, les émissions passent de  $764 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$  à  $543 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ , soit une réduction d'environ 29 %. Cette amélioration s'explique principalement par le recours à la rénovation des bâtiments existants et à l'utilisation de structures bois pour certaines nouvelles constructions.

### Cible limite SIA 390

La troisième barre (vert) représente la cible limite définie par la norme SIA 390. Cette valeur constitue un niveau de performance carbone considéré comme atteignable pour des projets intégrant une démarche de réduction des émissions.

### Cible ambitieuse SIA 390

La quatrième barre (jaune) représente la cible ambitieuse de la SIA 390. Elle correspond à des projets particulièrement performants du point de vue de l'optimisation du carbone incorporé et constitue une référence pour les projets souhaitant se positionner parmi les meilleures pratiques actuelles.

### 4.3. Analyses des résultats

Les résultats mettent en évidence des écarts importants selon les projets. Les rénovations présentent généralement les gains les plus significatifs par rapport au scénario standard. Par exemple :

- la rénovation du Silo permet une réduction de 38 %
- la Halle Grise atteint une réduction de 39 %
- le bâtiment du Gardien présente une réduction de 35 %
- le Bâtiment A réduit ses émissions de 50 %, ce qui constitue la meilleure performance parmi les rénovations étudiées.

À l'inverse, le projet B+ (nouveau bâtiment en béton) affiche des émissions identiques au scénario standard, ce qui montre qu'en l'absence d'interventions spécifiques sur les choix constructifs, les réductions de carbone restent limitées.

Les nouveaux bâtiments en bois présentent également des performances intéressantes. Le Périmètre D et le Périmètre B (voir fig 9) réduisent respectivement leurs émissions de 17 % et 19 % par rapport aux scénarios standards de référence.

Cependant, même avec les choix actuellement prévus, plusieurs projets restent encore éloignés de la cible ambitieuse de la SIA 390. Les écarts les plus importants concernent notamment :

- le Silo Rénovation (66 % de réduction supplémentaire nécessaire)
- la Maison du Gardien (69 %)
- le Bâtiment B+ (44 %)
- la Halle Grise (42 %)

Ces résultats montrent que le choix entre rénovation, béton ou bois constitue une première étape importante, mais qu'il ne suffit pas à lui seul pour atteindre les niveaux de performance carbone les plus ambitieux. Les données suggèrent également que les gains obtenus grâce au choix du type de construction sont déjà significatifs. Les efforts futurs devront donc davantage porter sur l'optimisation détaillée des systèmes constructifs, des matériaux et des quantités mises en œuvre plutôt que sur les grandes orientations de projet.

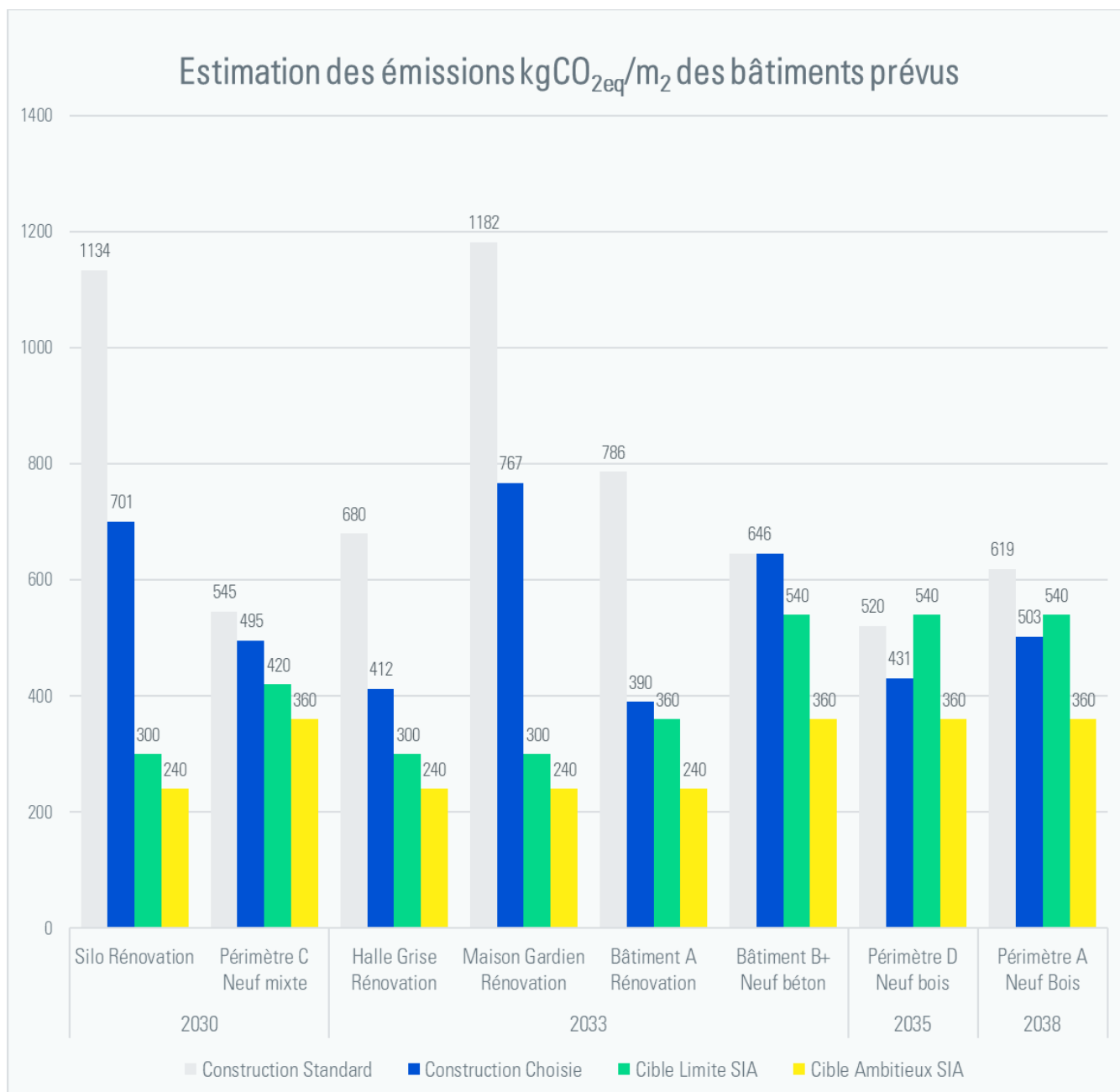


Figure 9 - Estimation des émissions  $\text{kgCO}_2/\text{m}^2$  des bâtiments prévus

| Année | Description               | Construction Standard | Construction Choisie | Cible Limite SIA | Cible Ambitieux SIA | Réduction entre Standard et Choisie | Réduction à faire entre Choisie et Ambitieux |
|-------|---------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2030  | Silo Rénovation           | 1134                  | 701                  | 300              | 240                 | 38%                                 | 66%                                          |
|       | Périmètre C Neuf mixte    | 545                   | 495                  | 420              | 360                 | 9%                                  | 27%                                          |
| 2033  | Halle Grise Rénovation    | 680                   | 412                  | 300              | 240                 | 39%                                 | 42%                                          |
|       | Maison Gardien Rénovation | 1182                  | 767                  | 300              | 240                 | 35%                                 | 69%                                          |
|       | Bâtiment A Rénovation     | 786                   | 390                  | 360              | 240                 | 50%                                 | 38%                                          |
|       | Bâtiment B+ Neuf béton    | 646                   | 646                  | 540              | 360                 | 0%                                  | 44%                                          |
| 2035  | Périmètre D Neuf bois     | 520                   | 431                  | 540              | 360                 | 17%                                 | 16%                                          |
| 2038  | Périmètre A Neuf Bois     | 619                   | 503                  | 540              | 360                 | 19%                                 | 28%                                          |
|       | Moyenne                   | 764                   | 543                  |                  | 300                 | 29%                                 |                                              |

Tableau 2 - Estimation des émissions  $\text{kgCO}_2/\text{m}^2$  des bâtiments prévus : détail



#### 4.4.Observations et réflexions

Malgré le caractère encore préliminaire des informations disponibles, les résultats transmettent un message clair. En effet, ils soulignent l'importance et la possibilité d'identifier les leviers de réduction d'intensité carbone pendant les phases de conception, bien en amont des appels d'offres. Et non uniquement au moment de l'achat des matériaux ni lors de l'exécution du chantier.

Les éléments constructifs ayant les plus fortes intensités carbone devraient donc être identifiés, discutés et, dans la mesure du possible, fixés dès les premières phases de conception avec les architectes et les ingénieurs. Ces éléments considèrent principalement, le type de béton, d'acier, mais aussi les éléments préconstruits. Cette approche permettra d'éviter les situations où des décisions importantes sont prises tardivement, notamment lors de l'approvisionnement des matériaux, lorsque les marges de manœuvre deviennent limitées. Il devient donc essentiel de clarifier le plus tôt possible les principaux choix constructifs afin de maximiser le potentiel de réduction carbone de chaque projet.

L'exercice de collecte des informations auprès de l'équipe Bluefactory, malgré les incertitudes encore présentes dans la planification des futurs bâtiments, permet déjà d'intégrer la réflexion carbone beaucoup plus en amont qu'il n'est habituellement possible de le faire. Cette démarche constitue un changement de paradigme important dans l'intégration des critères carbone au sein du processus de construction. Trop souvent, ces questions sont abordées tardivement, alors que de nombreuses décisions structurantes ont déjà été prises.

Les estimations réalisées montrent que les choix actuels de rénovation et de construction bois permettent déjà de réduire significativement les émissions futures du site. Elles mettent également en évidence les projets nécessitant une attention particulière pour atteindre les objectifs les plus ambitieux. Enfin, ces résultats offrent une base concrète pour anticiper les efforts d'optimisation à venir. En utilisant la cible ambitieuse de la SIA 390 comme référence, il devient possible d'identifier dès aujourd'hui les bâtiments présentant le plus fort potentiel d'amélioration et d'orienter les discussions de conception vers des solutions permettant de réaliser des bâtiments particulièrement performants du point de vue du carbone incorporé et de l'énergie grise.

### 5. Défis de la gestion carbone holistique d'un quartier

#### 5.1.Difficultés dans la récolte des données

Indépendamment du type de bilan CO<sub>2</sub>, qu'il s'agisse de construction ou d'exploitation, la récolte de données sourcées et vérifiables auprès des multiples acteurs du quartier, nécessaire à la génération d'un bilan CO<sub>2</sub>, a constitué l'une des principales difficultés rencontrées dans le projet.

En pratique, les parties prenantes concernées par la transmission des informations nécessaires aux calculs des bilans CO<sub>2</sub> étaient déjà fortement sollicitées, et la récolte de ces informations demandait un investissement important en temps. Elle était donc reléguée très bas dans la liste des priorités.

Cette difficulté a été rencontrée dans l'ensemble des volets du projet. D'une part pour le bilan d'exploitation, par exemple lors de la récolte des données de mobilité pendulaire des collaborateurs. D'autre part pour les bilans CO<sub>2</sub> des chantiers, où il fallait d'abord identifier, avec BFF SA, quelle partie prenante était responsable de transmettre les valeurs quantitatives du chantier, ou à défaut le contact des acteurs susceptible de les fournir.

À cela s'ajoute le fait que les données étaient souvent fournies dans des formats différents, en particulier pour les données d'ingénieurs et les descriptifs des travaux des différents bâtiments, ce qui rendait leur traitement particulièrement chronophage. Pour atténuer cette difficulté, une partie de la suite d'outils a été développée de manière à pouvoir intégrer des informations de qualité variable, avec une granularité plus ou moins précise, en particulier pour la construction. Cela permettait de travailler sur des bases hypothétiques plutôt que sur des chiffres effectivement collectés. Toutefois, même si ces bilans grossiers permettent de conserver un ordre de grandeur cohérent, ils restent moins précis que des bilans fondés sur des valeurs réelles. Cela vaut autant pour la construction que pour les bilans d'exploitation.

Afin de faciliter cet aspect, il serait judicieux de désigner des ambassadeurs CO<sub>2</sub> chargés de coopérer avec l'entreprise mandatée pour réaliser le bilan CO<sub>2</sub> du site. Cette personne devrait disposer de responsabilités explicites et de temps alloué dans son cadre de travail afin d'assurer la gestion carbone du site. Cette mesure permettrait d'obtenir une vision plus précise des bilans carbone actuels.

## 5.2. Temporalités différentes des bilans

Les différents outils produisent des informations CO<sub>2</sub> qui ne s'inscrivent pas dans les mêmes temporalités. Certaines émissions sont ponctuelles, d'autres s'inscrivent dans le temps. Les bilans d'énergies grises ainsi que les bilans d'exploitation correspondent à des émissions à un instant donné.

Pour certaines analyses d'énergies grises, une méthode d'amortissement sur la durée de vie du bâtiment avait initialement été envisagée. Cette approche a finalement été abandonnée afin d'illustrer un pic d'émissions l'année de livraison du bâtiment, même si celui-ci n'est pas construit sur une seule année. C'est également l'approche imposée par le Greenhouse Gas Protocol.

À l'inverse, les outils liés au budget carbone d'exploitation et aux plans d'action produisent des informations sur une temporalité étendue. Les résultats ne correspondent donc pas à un simple bilan CO<sub>2</sub> pour une année donnée, mais décrivent l'évolution des émissions dans le temps en fonction de différents facteurs, comme les mesures mises en œuvre. Une situation similaire se présente pour certains bilans de construction, notamment les aménagements extérieurs, avec le potentiel de captation CO<sub>2</sub> par les végétaux.

Pour faciliter la lecture et l'interprétation des résultats, il a été décidé de ne pas intégrer ces informations temporelles dans le cockpit carbone. Celles-ci restent toutefois consultables dans les analyses annexes réalisées au fil du projet E.2.5. Dans le cadre du Plan Climat, le budget carbone

de l'exploitation du site et les plans d'action nécessaires pour le respect de ces budgets n'ont pas été quantifiés. La seule analyse temporelle effectivement menée concerne le paysagisme de la renaturation urbaine. Elle figure dans l'outil pour les constructions.

### 5.3. Mise à jour des facteurs d'émission

Un autre défi lié à la gestion carbone d'un site sur une longue période concerne l'évolution constante des facteurs d'émission, qui sont indispensables au calcul des émissions. Les bases de données utilisées pour établir les différents bilans évoluent en permanence, généralement dans le sens d'une amélioration de leur qualité, ce qui peut faire varier les résultats. À mesure que les connaissances progressent, les bilans évoluent eux aussi. Cela concerne notamment les bases de données KBOB, ecoinvent et Mobitool, utilisée pour les transports et la mobilité pendulaire.

De ce fait, les bilans finaux changent avec le temps. Il n'existe actuellement pas de solution pleinement satisfaisante à ce sujet. Nous recommandons plutôt de fonder l'interprétation des résultats sur leur lecture d'ensemble plutôt que sur l'exactitude absolue des chiffres. Les questions importantes sont les suivantes : les ordres de grandeur ont-ils changé, la catégorie la plus prépondérante reste-t-elle la même que l'année précédente, et la lecture globale du bilan CO<sub>2</sub> reste-t-elle identique malgré l'évolution des facteurs d'émission. D'après notre expérience, c'est généralement le cas.

Cette question se pose également pour les prédictions des bilans futurs du site. En suivant les objectifs net zéro à l'horizon 2050, il serait légitime de considérer que les facteurs d'émission de nombreux éléments devraient tendre vers zéro. Autrement dit, la production d'une tonne de béton aujourd'hui ne correspondrait pas à celle de 2050, dans l'hypothèse où cette production serait fortement décarbonée d'ici là. Cette perspective reste toutefois hypothétique. L'objectif même des résultats CO<sub>2</sub> produits est avant tout d'aider à la décision afin de favoriser des choix allant dans le sens de la décarbonation. Faire l'hypothèse que les émissions vont diminuer sans intervention reviendrait à encourager l'inaction. Il a donc été décidé de calculer les bilans futurs à l'aide des facteurs d'émission de l'année du bilan CO<sub>2</sub> en cours.

### 5.4. Comparaison entre bilans estimatifs, bilans fictifs et bilans actuels

L'un des objectifs du projet consistait à produire des bilans prévisionnels de certains aspects du site, qu'il s'agisse du bilan CO<sub>2</sub> du site à une année future donnée ou d'une construction livrée à une date donnée. Ces bilans estimatifs nécessitent néanmoins une coopération avec les parties prenantes concernées. En pratique, les bilans CO<sub>2</sub> ont été réalisés sur la base d'estimations des travaux à effectuer pour les différents projets. Une fois les constructions achevées, il y avait peu d'intérêt à recommencer le travail pour un même bâtiment avec les valeurs réelles, car cela demandait un investissement en temps trop important.

Une situation comparable s'est présentée pour la renaturation urbaine, pour laquelle un bilan a été établi sur la base des descriptifs de travaux à fournir par les ingénieurs. Ces descriptifs

représentaient toutefois une estimation des travaux à effectuer en vue d'établir un prix. Ils constituent donc une base pertinente pour représenter l'ordre de grandeur CO<sub>2</sub> du projet. De nombreuses mesures visant à réduire l'empreinte carbone avaient déjà été intégrées dans ces descriptifs, notamment par le réemploi de nombreux matériaux, ce qui a permis d'éviter, par exemple, la mise en œuvre d'un volume important de béton.

Il aurait été intéressant de comparer ce projet à un projet fictif sans mesures afin d'évaluer la réduction CO<sub>2</sub> induites par les mesures prévues dans le projet. Là encore, ce type d'analyse a été jugé trop conséquente pour être réalisée dans le cadre de ce projet.

## 6. Conclusion et prochaines étapes

Comme mentionné dans l'introduction, l'enjeu principal est d'identifier les aspects les plus émissifs du site, qu'il s'agisse du chauffage, des constructions, ou encore, au sein même de ces constructions, des éléments les plus contributeurs aux émissions.

Il s'agit également de répondre à la question de savoir si les efforts entrepris ont permis une réduction significative des émissions par rapport à une construction de bâtiment plus conventionnelle. Comme mentionné au paragraphe 5, ce travail n'a pas encore été réalisé.

Pris individuellement, chacun des outils présentés est en mesure d'apporter ce type d'information.

La vue d'ensemble offerte par le graphique du cockpit CO<sub>2</sub> permet toutefois d'identifier plus directement les points nécessitant une analyse approfondie. Elle permet aussi de tirer des enseignements des constructions passées et de soutenir une meilleure optimisation carbone pour les projets à venir.

Si l'objectif est d'assurer un suivi carbone continu du site, une condition importante semble être la désignation d'ambassadeurs disposant d'une responsabilité explicite de coopération avec les parties prenantes chargées de réaliser ces bilans carbone. Cette exigence pourrait être formalisée dès la signature des contrats entre les parties prenantes et l'instance responsable du quartier, à savoir BFF SA.

Cela concerne notamment les ingénieurs amenés à proposer des projets, pour lesquels cette dimension pourrait être intégrée dans les appels d'offres, mais aussi les architectes dès les phases initiales de conception. Cette logique devrait également se poursuivre durant les phases de construction et d'exploitation des bâtiments, afin de permettre une comparaison entre les estimations initiales et les résultats observés, et ainsi évaluer dans quelle mesure les réorientations de projet ont effectivement conduit à une décarbonation.

Concernant les prochaines étapes, ces bilans carbone constituent en tout état de cause une base essentielle pour engager l'élaboration d'une stratégie de décarbonation du site. Il s'agirait notamment de définir des objectifs pour le bilan d'exploitation qui tient compte de la croissance de du site, ainsi que de mettre en place des mesures permettant de réduire les émissions liées à

l'exploitation du site. Ces budgets pourraient être alloué aux entreprises qui sont in fine responsable de la réduction de leurs émissions. Cette étape pourrait être gérée par BFF SA et impliquerait la responsabilité de chaque acteur du site, afin d'assurer une trajectoire cohérente vers le net zéro à l'horizon 2050.