



ANALYSE DES OUTILS ET METHODES EXISTANTS SUR L'EVALUATION ENERGIE ET CARBONE DES PROJETS D'AMENAGEMENT

Quartier E+C- : Sous-tâche 2.3

Mai 2019

***Auteurs et contributeurs :** Emmanuel PETEUIL, Adélaïde Mailhac, Lionel CAUCHARD, Romain Bonabe de Rouge, Raphael PARENT, Emilien PARON*

TABLE DES MATIERES

Liste des illustrations	4
Rappel du contexte du projet E+C- Quartier	5
1 Présentation du périmètre et de la bibliographie utilisée	6
1.1 Objectifs du document	6
1.2 Bibliographie.....	7
2 Méthodes d'évaluation environnementales de projet d'aménagement.....	8
2.1 Label EcoQuartier	8
2.2 Référentiel RFSC	10
2.3 HQE Aménagement	11
2.4 BREEAM Communities.....	13
2.5 LEED for Neighborhood Development	13
2.6 CASBEE for Urban Development	14
3 L'analyse de Cycle de Vie appliquée aux projets d'aménagement et aux autres échelles territoriales	16
3.1 La définition des objectifs et du champs de l'étude.....	16
3.1.1 La définition des objectifs	16
3.1.2 Champs de l'étude	16
3.2 Inventaire de cycle de vie	20
3.3 La phase d'évaluation	22
3.3.1 Base Carbone [®] :	22
3.3.1 Base GaBi :	23
3.3.2 Base INIES :	24
3.3.3 Base IMPACTS :	24
3.3.4 Comparaison des différentes bases de données environnementales recensées	Erreur ! Signet non défini.
3.4 Interprétation	25
3.5 Analyse de cycle de vie appliquée aux autres échelles territoriales	26
3.5.1 Echelle de la planification territoriale	27
3.5.2 Projets de construction ou rénovation à l'échelle du bâtiment ou de la parcelle	28
4 Analyse des outils existants	31



4.1	Outils d'évaluation ACV multi contributeurs adaptés à l'échelle des projets d'aménagement.....	31
4.1.1	GES Opam - Cerema, Ademe.....	32
4.1.2	Nest - NOBATEK, INEF4	33
4.1.3	NovaEQUER - Izuba, CES Mines ParisTech	35
4.1.4	Urban Print - Efficacity, CSTB	36
4.2	Outils de calcul dynamique des consommations d'énergie en exploitation à l'échelle des projets d'aménagement	37
4.2.1	City Energy Analyst - EPFL, Singapore ETH Centre, ETH Zürich, Future Cities Laboratory	39
4.2.2	CitySim Pro - EPFL.....	40
4.2.3	Pleiades+Comfie - IZUBA, CES Mines ParisTech	42
4.2.4	PowerDis (Dimosim) - Efficacity, CSTB	43
4.2.5	Smart-E - CES Mines ParisTech.....	44
4.2.6	UMI - MIT, CCES National Science Foundation EFRI_SEED	45
4.3	Travaux intégrant la prise en compte d'une évolution comportementale pour l'évaluation d'impact environnementaux	47
4.3.1	Prospective climatique et évolution des comportements	47
4.3.2	Prévision comportementale à l'échelle des projets d'aménagement.....	47
5	Synthèses outils et methodes	49
5.1	Synthèse de l'analyse des méthodes existantes.....	49
5.2	Synthèse de l'analyse des outils d'évaluation	52
5.2.1	Synthèse des outils d'évaluation ACV multi contributeurs adaptés à l'échelle des projets d'aménagement	52
5.2.2	Synthèse des outils de calcul dynamique des consommations d'énergie	54
5.2.3	Synthèses des travaux intégrant la prise en compte d'une évolution comportementale pour l'évaluation d'impact environnementaux	57



Liste des illustrations

Figure 1 : Les étapes de la labellisation EcoQuartier (source EcoQuartier)	9
Figure 2 : Les 20 engagements de la labellisation EcoQuartier (source http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr)	10
Figure 3 : SMO HQE-aménagement et AEU (Source Référentiel HQE - Aménagement)	11
Figure 4 : Les 17 thématiques d'aménagement durable (Source Référentiel HQE - Aménagement).....	12
Figure 5 : – Méthodologie d'évaluation d'un projet par CASBEE for Urban Development (Source CASBEE)	14
Figure 6 – Notation du projet par sous-dimensions (radar) Figure 7 – Efficience environnementale du projet	15
Figure 8 : Périmètre « orienté producteur » versus périmètre « orienté consommateur » (Source : Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC)).....	17
Figure 9 : Comparaison des périmètres fonctionnels pour l'évaluation d'un territoire (Mailhac, 2019)	19
Figure 10 : Catégories de la base de données Base Carbone® (Source Ademe)	23
Figure 11 : Comparaison des différentes bases de données environnementales recensées	24
Figure 12 : La méthode d'évaluation Bilan Carbone® exigée par la LTECV analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV	27
Figure 13 : La méthode d'évaluation E+C- bâtiment analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV.....	29
Figure 14 : Les méthodes d'évaluation Bilan Carbone® (exigée par la LTECV dans les PCAET) et E+C- bâtiments analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV.	51
Figure 15 : Tableau de synthèse de l'analyse des outils d'évaluation d'impact environnementaux multi contributeurs à l'échelle des projets d'aménagement	52
Figure 16 : Tableau de synthèse de l'analyse des outils existants de simulation dynamique des consommations	54



RAPPEL DU CONTEXTE DU PROJET E+C- QUARTIER

Dans la lignée de l'Accord de Paris, la filière française du bâtiment s'est engagée dans une démarche collective ambitieuse visant à produire des bâtiments à énergie positive et faible empreinte carbone. Lancée en 2016, l'expérimentation E+C- préfigure ainsi la future réglementation environnementale. Cette expérimentation prend aujourd'hui une nouvelle dimension avec le projet Quartier E+C-.

Comptant parmi les lauréats de la 4ème édition de l'appel à projets de recherche de l'ADEME « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 », ce projet sera réalisé par un consortium fédérant le CSTB, Elioth, l'Alliance HQE-GBC, Efficacity, Effinergie, Certivéa, l'Association BBKA et Atlantech. Il vise à développer et tester une méthode d'évaluation Énergie Carbone à l'échelle du quartier. Cette contribution viendra nourrir les travaux plus larges d'intégration des problématiques environnementales dans la conception urbaine, et participera à faire de l'aménagement opérationnel un levier essentiel vers des territoires plus vertueux en matière de performance environnementale.

Ce projet de recherche et développement s'organise en 3 grandes phases, de la définition du cahier des charges à l'élaboration de la méthode et à son application à 8 projets pilotes, pour des résultats attendus en mars 2021.

Les enjeux du projet de recherche Quartier E+C-

Lancée en 2016 par les pouvoirs publics afin de préparer la future réglementation environnementale, l'expérimentation E+C- accompagne les acteurs de la construction vers la généralisation de bonnes pratiques de réduction de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre. Au-delà du bâtiment, les opérations d'aménagement représentent autant d'opportunités à saisir pour engager les territoires sur la voie de la transition énergétique et écologique. Les choix effectués en matière de planification, d'organisation spatiale, de morphologie urbaine, de localisation des emplois et des activités, de gestion des mobilités... impactent en effet fortement leurs performances énergétiques et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ce projet s'inscrit dans la dynamique de la future RE2020 qui proposera des méthodes de l'Analyse du Cycle de Vie et des ambitions quantifiées pour l'énergie et le carbone à l'échelle des bâtiments. Le changement d'échelle, du bâtiment au quartier, implique de développer des modes d'approche spécifiques. Un quartier est, plus qu'une somme de bâtiments, un système global qui a un fonctionnement propre, en interaction avec la ville. L'évaluation devra tenir compte du contexte de l'opération, intégrer différents scénarios prospectifs portant tant sur l'usage du quartier que sur les coûts des énergies et l'impact du changement climatique.

Le projet Quartier E+C- implique la définition d'ambitions réalistes en matière d'énergie et de carbone, tenant compte de paramètres nombreux, reliés entre eux par des relations complexes. Plus que des valeurs cibles, il s'agira d'identifier les éléments majeurs permettant d'estimer ces objectifs. Le changement d'échelle du bâtiment au quartier nécessite en effet de redéfinir les contributeurs et de prendre en compte également - outre les produits et équipements, le chantier, l'énergie et l'eau - les déplacements, les réseaux, le traitement des déchets, l'éclairage public, la réalisation des infrastructures, les espaces publics...



1 PRESENTATION DU PERIMETRE ET DE LA BIBLIOGRAPHIE UTILISEE

1.1 Objectifs du document

Ce document constitue le livrable de la sous-tâche 2.3 du projet de recherche E+C- Quartier : **Analyse des outils et méthodes existants sur l'évaluation énergie carbone des projets d'aménagement**. Il vise à recenser les méthodes et outils existants ou en développement pour l'évaluation des consommations d'énergie primaire et émission de gaz à effet de serre des projets d'aménagement. L'enjeu du projet de recherche E+C- Quartier est en effet de s'appuyer au maximum sur des outils d'évaluation développés par ailleurs ou de capitaliser sur des méthodes existantes. Ce document a donc pour but d'apporter des éléments de références sur les pratiques actuelles d'évaluation énergie carbone des projets d'aménagement pour nourrir le travail d'élaboration de la méthode E+C- Quartier. Le document analysera les objets suivants :

- Les principales méthodes existantes d'évaluation environnementale s'appliquant aux projets d'aménagement à travers des labels ou certifications
- La méthode d'Analyse de Cycle de Vie appliquée aux projets d'aménagement puis illustrée à une autre échelle territoriale : L'échelle de la planification territoriale ou à l'échelle des bâtiments
- Les outils existants permettant de réaliser ou de contribuer à la réalisation d'une Analyse de Cycle de Vie à l'échelle des projets d'aménagement



1.2 Bibliographie

La bibliographie utilisée est référencée au fil du document à l'aide de notes de bas de page ou directement dans le corps du texte. La liste des principales sources bibliographiques analysées pour construire ce document sont les suivantes (organisée par section) :

2. Méthodes d'évaluation environnementales de projet d'aménagement :

- **Tous** : *Référentiels techniques des labels et certifications retenus*

3. L'analyse de Cycle de Vie appliquée aux projets d'aménagement et aux autres échelles territoriales

- **3.1. La définition des objectifs et du champs de l'étude** : *Normes ISO 14 044 et ISO, 2006b ; Mailhac, 2019 ; Loiseau, 2014 ; WRI, 2014 ; BSI, 2013*
- **3.2. Inventaire de cycle de vie** : *[Mailhac, 2019]*
- **3.3. La phase d'évaluation** : *Sites internet accueillant les bases de données analysées ;*
- **3.4. Interprétation** : *Normes ISO 14 044 et ISO, 2006b ; « BBCA Quartier : Vers le quartier bas carbone » ; [Lotteau, 2017]*
- **3.5. Analyse de cycle de vie appliquée aux autres échelles territoriales** : *Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV, 2015) et Rapport Ademe Bonnes pratiques des territoires en faveur du climat – Enquête 2017 pour l'échelle collectivité ; Référentiels techniques des labels et certifications retenus pour l'échelle bâtiment*

4. Analyse des outils existants

- **4.1. Outils d'évaluation ACV multi contributeurs adaptés à l'échelle des projets d'aménagement** : *Documentations techniques des outils ; état de l'art de la thèse Marc Lotteau (2017) ; Slides de présentation des outils ACV Quartier du Séminaire HQE Performance quartier (décembre 2018)*
- **4.2. Outils de calcul dynamique des consommations d'énergie en exploitation à l'échelle des projets d'aménagement** : *Publications scientifiques et thèses associées aux développements des outils ; Documentations techniques des outils ; référence à des publications de validation scientifiques des outils*
- **4.3 Travaux intégrant la prise en compte d'une évolution comportementale pour l'évaluation d'impact environnementaux** : *Travaux prospectifs climatiques ou énergétiques disponibles dans la littérature. Publications ANR IMPETUS ; rapport ADEME Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité ; projet de recherche Cordees.*



2 METHODES D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALES DE PROJET D'AMÉNAGEMENT

Il existe de nombreux référentiels techniques de labels ou certifications constituant des méthodes d'évaluation de la qualité environnementale d'un projet d'aménagement. Ces labels et certifications certifient qu'un projet atteint une certaine qualité environnementale en exigeant au travers de leurs référentiels techniques la bonne mise en place de leviers d'action, de cibles de performance pertinentes sur certains aspects de l'opération, d'un management adapté ou de services. L'analyse de ces référentiels technique a donc son importance pour la construction de la méthode E+C- Quartier. En effet, ils décrivent un très grand nombres de leviers d'action aux mains des aménageurs et témoignent des méthodes d'évaluation pratiquées aujourd'hui dans les projets. Lorsque les porteurs de projets mettent en œuvre ces méthodes d'évaluation, ils peuvent être amenés à estimer la consommation énergétique ou les émissions de GES de certaines actions spécifiques (exemple : évaluer la consommation de la part d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique en exploitation du projet pour le référentiel RFSC). Cependant cette évaluation quantifiée n'y est pas faite de manière exhaustive pour l'ensemble des contributeurs d'un projet d'aménagement comme l'imposerait une Analyse de Cycle de Vie (ACV) sur un projet. Aujourd'hui on ne recense pas de méthode ACV qui se serait imposée dans les projets d'aménagement au travers d'une approche standardisée que constituerait un label, une certification, une norme, une méthode déposée (®) ou un référentiel technique reconnu.

La première partie du présent document va donc exposer les principaux labels et certifications environnementales utilisées dans les projets d'aménagement.

2.1 Label EcoQuartier

La démarche EcoQuartier fait l'objet d'une labellisation depuis 2012 par le ministère chargé de l'urbanisme et du logement (DGALN/DHUP). Fin 2017, le Ministère a dénombré 500 projets labellisés ou en cours de labellisation EcoQuartier. Le Ministère affiche des objectifs ambitieux pour le label car il souhaite généraliser la démarche EcoQuartier sur l'ensemble du territoire aussi bien dans l'urbain que le rural. La démarche EcoQuartier est ainsi très structurante pour les collectivités, les aménageurs publics et privés, et l'ensemble des parties prenantes des opérations d'aménagement.

Lors de la première étape de labellisation, le porteur de projet s'engage dans la démarche EcoQuartier en signant la Charte nationale des EcoQuartiers. La deuxième étape intervient juste avant la mise en chantier. A ce stade, les objectifs visés doivent être stabilisés et le projet fait l'objet d'une première expertise. Une seconde expertise est conduite pour permettre au projet d'atteindre l'étape 3 du label. Elle est réalisée au moment de la livraison du projet pour vérifier si les réponses apportées et les résultats attendus sont bien à la hauteur des enjeux. En complément de ces trois étapes initialement prévues dans le cadre de la démarche EcoQuartier, une quatrième étape de labellisation est désormais proposée (à la suite d'opérations pilotes conduites en 2017) aux collectivités qui souhaitent évaluer leur écoquartier quelques années après la livraison du projet (évaluation ex post). Cette dernière étape montre la **volonté du Ministère de renforcer le volet « évaluation » du label** en s'intéressant aux résultats concrets obtenus par les projets EcoQuartiers en phase de vie.

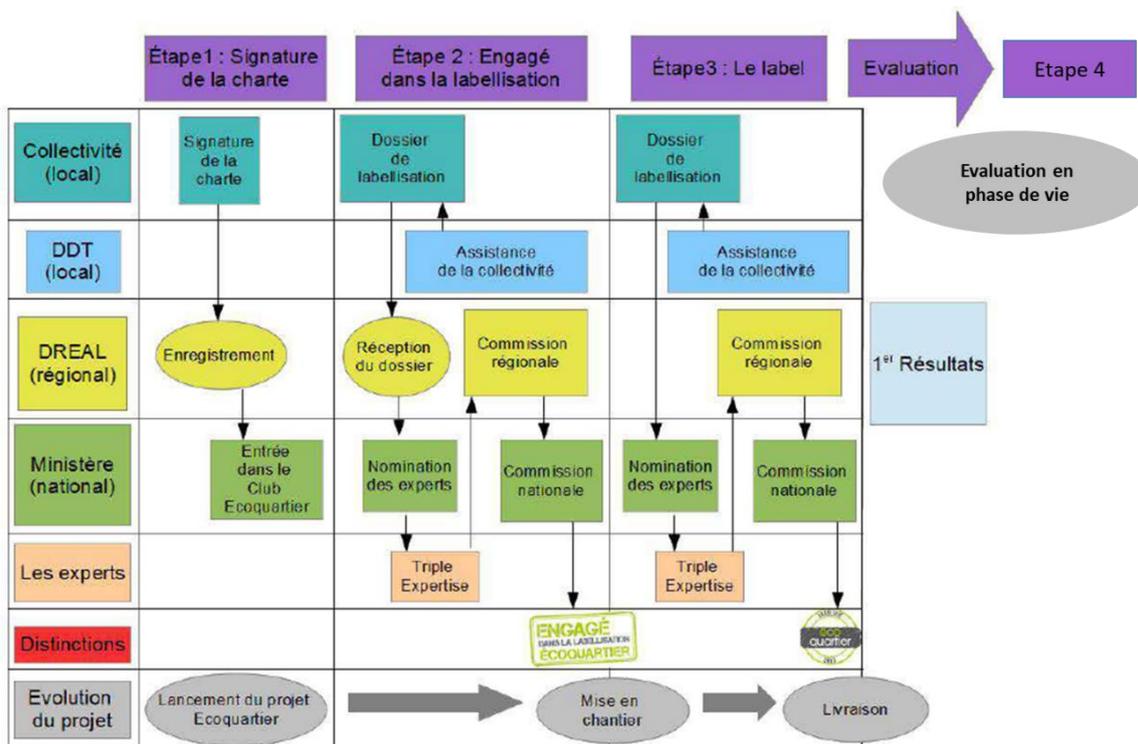


Figure 1 : Les étapes de la labellisation EcoQuartier (source EcoQuartier)

Au-delà des 4 étapes de labellisation, la démarche EcoQuartier est structurée autour de 20 engagements auxquels doit répondre un porteur de projet s'il souhaite obtenir le Label EcoQuartier. Ces 20 engagements s'articulent suivant 4 dimensions : Démarche et processus, Cadre de vie et usages, Développement territorial, Environnement et climat.

Pour évaluer la façon dont les porteurs de projet suivent la démarche EcoQuartier et pour les guider dans leur choix de programmation et de conception, des « questions évaluatives » qualitatives sont proposées pour chacun des 20 engagements (exemple : « Les objectifs en matière de sobriété et d'efficacité énergétiques ont-ils été atteints ? » pour l'engagement 17). Ces critères d'évaluation sont complétés par des indicateurs quantitatifs principaux et secondaires qui visent à assurer le suivi et l'évaluation des résultats du projet d'écoquartier.



Figure 2 : Les 20 engagements de la labellisation EcoQuartier (source <http://www.centre.developpement-durable.gov.fr>)

2.2 Référentiel RFSC

En mai 2007, les Ministres européens en charge du développement durable ont signé la "Charte de Leipzig sur la Ville Européenne Durable" en vue de l'amélioration des politiques en matière de développement urbain intégré, avec une attention particulière pour les territoires urbains défavorisés. En novembre 2008, les Ministres européens, réunis à Marseille, ont appelé à la mise en application de la Charte en reconnaissant les implications du changement climatique et environnemental pour les villes et la nécessité d'adopter des mesures d'adaptation. Les Ministres ont convenu de la nécessité d'un outil permettant de mettre en pratique les objectifs communs de développement durable et les recommandations de la Charte de Leipzig.

Le référentiel des villes et territoires durables (RFSC) a ainsi été créé pour aider les collectivités à améliorer la conception et la promotion de stratégies et de projets aptes à stimuler le développement urbain durable. Les organismes bénévoles ou les organisations opérant au niveau des communautés ainsi que les entreprises peuvent également utiliser cet outil comme support pour lancer le débat au niveau local et faciliter la prise de décision en matière de développement durable.

Le RFSC reste néanmoins assez marginalement utilisé par les collectivités sur des projets réels. L'outil RFSC propose une évaluation des projets à partir de cinq dimensions : spatiale, gouvernance, sociale & culturelle, économique, environnementale. Chaque dimension se décline en 6 objectifs stratégiques puis un indicateur principal et des indicateurs secondaires sont proposés pour évaluer les performances du projet urbain.

Par exemple pour la dimension Spatiale, le référentiel propose l'indicateur « Proximité des services de base » en y établissant la part d'habitants du quartier vivant assez près d'un service de base de proximité (selon une échelle de distance dépendant de la nature du service).

2.3 HQE Aménagement

- **Système de management d'une opération**

HQE Aménagement est un référentiel sur le système de management d'une opération (SMO) d'aménagement qui a été développé par Alliance HQE-GBC (anciennement Association HQE). La certification est opérée depuis 2011 par Certivéa, la filiale de certification du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

L'objectif du SMO est d'organiser la conduite de l'opération, en maîtrisant les processus d'analyses, programmation, conception, réalisation et rétrocession, afin d'optimiser l'effort des acteurs en vue d'un aménagement durable. Il pose des exigences pour chaque phase de l'opération d'aménagement et insiste sur les modalités de gestion du projet.

L'association HQE a édité en 2010 un guide de « La démarche HQE-Aménagement » qui propose 17 fiches thématiques pour les projets à l'échelle urbaine. Ce guide montre aussi la complémentarité entre la démarche HQE et l'Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU) portée par l'ADEME. Comme présenté dans le schéma ci-contre, l'AEU est mobilisée pour les phases amont d'une opération d'aménagement, depuis l'analyse initiale jusqu'au choix des actions du projet d'aménagement durable.

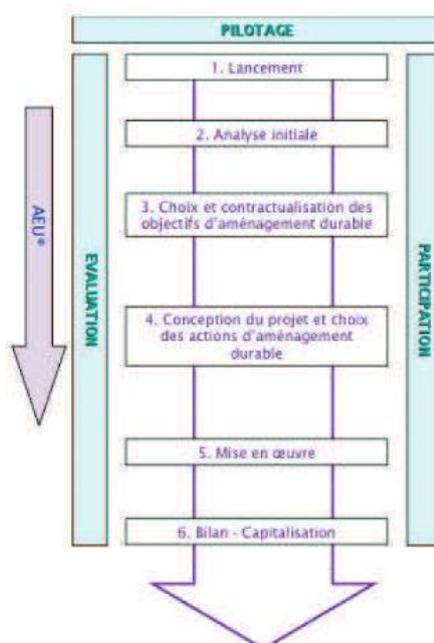


Figure 3 : SMO HQE-aménagement et AEU (Source Référentiel HQE - Aménagement)

La démarche « HQE Aménagement » s'adapte aisément aux spécificités du contexte local, du fait de l'entrée privilégiée par le système de management de l'opération et du champ libre laissé à l'aménageur et à la collectivité pour définir leurs propres objectifs et indicateurs de développement durable (dans un cadre général avec 17 thématiques d'aménagement durable), sa principale lacune est le manque d'un véritable outil d'évaluation des résultats obtenus et des impacts générés par un projet sur un territoire.

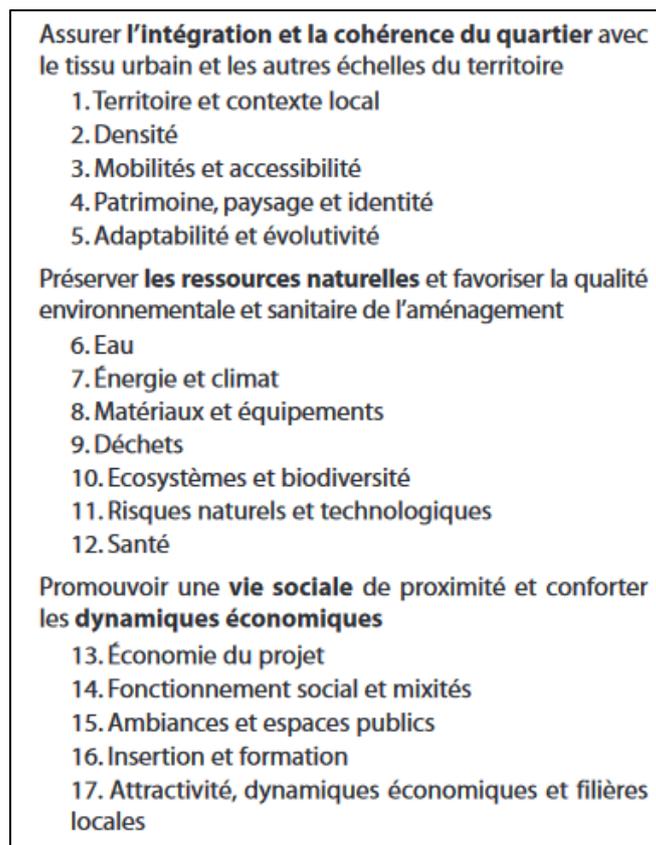


Figure 4 : Les 17 thématiques d'aménagement durable (Source Référentiel HQE - Aménagement)

- **HQE Performance Quartier et Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU2)**

Pour renforcer son approche évaluative des projets d'aménagement, l'Alliance HQE-GBC, en collaboration avec l'ADEME et le Ministère de la Cohésion des Territoires, a lancé en 2018 un appel à test « HQE Performance quartier » auprès de porteurs de projets d'aménagement. Trois premières thématiques sont visées par le test « HQE Performance » : Mobilité, Énergie/Climat et Économie circulaire. Cette nouvelle initiative vise à créer un outil d'évaluation des résultats obtenus et des impacts générés par un projet sur un territoire. Pour se faire, la batterie d'indicateurs d'**Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU2) de l'ADEME** a été proposée lors de ce test.

L'Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU2) a été développée par l'ADEME. Il s'agit d'un document d'aide à la mise en œuvre d'une évaluation des projets d'aménagement qui intervient plus particulièrement dans les phases amont en aidant les aménageurs à définir leurs objectifs de développement durable.

Les indicateurs proposés permettent de suivre et de vérifier la bonne atteinte des performances visées par l'aménageur au regard des objectifs initialement définis pour son opération. La batterie d'indicateurs proposée découle très largement d'un travail de benchmark établi sur la base des principaux référentiels existants (essentiellement au niveau français). Du fait de ce travail important de benchmark, la batterie d'indicateurs de l'AEU2 a été reprise partiellement par d'autres démarches françaises sur l'aménagement durable (Label EcoQuartier, RFSC, Programme « Ville de demain », test de la batterie d'indicateurs AEU2 dans le cadre du chantier « HQE performance quartier » ...). Exemple d'indicateur : « Part de la surface de plancher de bâtiments consommant de la chaleur ou de l'électricité produite par des EnR ».

L'objectif est de faciliter l'appropriation des différents cadres d'évaluation proposés aux collectivités (Label EcoQuartier, NPNRU, RFSC, référentiels de grandes agglomérations...) et de contribuer à leur convergence.

La démarche de l'AEU2 est structurée selon 4 étapes clés :

- Vision : aide à l'expression de la vision politique du projet au regard des données structurantes du territoire et des enjeux auxquels le projet devra répondre.
- Ambition : détermination des objectifs et actions qui permettent de répondre aux enjeux retenus dans l'étape précédente.
- Transcription : traduction des objectifs retenus en dispositions concrètes dans les différents supports constitutifs du projet.
- Concrétisation : si la mission de l'AEU2 s'arrête stricto sensu avant la phase de mise en œuvre de l'aménagement, l'outil permet néanmoins d'assurer un suivi et un accompagnement du projet (objectifs, actions, indicateurs...).

2.4 BREEAM Communities

Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) Communities a été développé par le Building Research Establishment (BRE) en 2008. Il s'agit d'un référentiel de certification de la qualité environnementale, sociale et économique des opérations d'aménagement urbain. Il propose aux aménageurs et promoteurs, aux collectivités locales et aux équipes de conception un cadre pour examiner les questions de durabilité des territoires.

BREEAM Communities appartient à la catégorie des check lists, c'est-à-dire des démarches centrées plutôt sur les moyens à mettre en œuvre (i.e. les « bonnes pratiques ») que sur l'évaluation des performances (l'évaluation des impacts d'un projet sur l'environnement). Ces approches privilégient le plus souvent un angle prescriptif (une standardisation des solutions à apporter) qui peut générer des effets pervers dans la prise en compte locale des atouts et faiblesses d'un projet d'aménagement. Enfin, les spécificités normatives et réglementaires nationales sont très présentes, ce qui pose question quant à leur transposition dans d'autres contextes réglementaires. Néanmoins une quinzaine de projets a été certifiée BREEAM Communities en dehors du Royaume-Uni (notamment en Finlande, en Suède, en Belgique et en Bulgarie).

BREEAM Communities comporte six grandes catégories : « gouvernance », « bien-être social et économique », « ressources et énergie », « occupation du sol et écologie », « transport et mobilité » et « innovation ». Chacune des catégories est déclinée en sous-objectifs qui fournissent un certain nombre des points (« crédits ») si les exigences sont atteintes. La somme des points détermine le niveau de certification obtenu (Outstanding, Excellent, Very Good, Good, Pass, Unclassified).

2.5 LEED for Neighborhood Development

La certification Leadership in Energy and Environmental Design for Neighborhood Development (LEED-ND) a été développée par l'US Green Building Council (US-GBC) en 2009.

Initialement, LEED-ND était assez proche en termes de positionnement de l'approche britannique. LEED-ND s'est progressivement éloigné de type « check lists » pour intégrer davantage l'évaluation des performances des projets d'aménagement (et non plus seulement des prescriptions en termes de moyens à mettre en œuvre). Du fait que les références aux spécificités normatives et réglementaires américaines soient très présentes, LEED-ND se développe surtout en Amérique du Nord. Il a fait notamment l'objet d'une adaptation officielle pour le contexte canadien (avec le Canada Green Building Council).



LEED-ND se décline en cinq grandes catégories : « Localisation, connexion et réseaux », « Agencement et conception du quartier », « Bâtiments et infrastructures durables », « Innovation et processus de construction », « Priorité régionale ». Comme l'approche britannique, on retrouve un système à points (i.e. credits) qui détermine le niveau de certification obtenu (Platine, Or, Argent, Base).

2.6 CASBEE for Urban Development

La démarche japonaise, Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency (CASBEE) for Urban Development, a été développée par le Japan Sustainable Building Consortium (JSCB). Elle est certifiée par l'IBEC (Institute for Built Environment and Energy Conservation).

La démarche CASBEE évalue l'efficacité environnementale d'un projet d'aménagement, sous l'angle du rapport entre d'un côté, la qualité environnementale d'un projet (Préservation de l'eau, biodiversité, sécurité, services de proximités, congestion, artificialisation des sols, potentiel économique, smart-city) et de l'autre son impact environnemental global (émissions de GES avec la mobilité, les bâtiments et les puits carbonés).

Pour évaluer un projet d'aménagement, CASBEE for Urban Development définit une frontière virtuelle pour le projet qui est l'objet de l'évaluation. Le projet est ensuite évalué sous les deux dimensions de la qualité environnementale à l'intérieur de la frontière virtuelle (Q_{UD}) et de l'empreinte environnementale globale à l'extérieur de cette même frontière (L_{UD}). Le schéma ci-dessous illustre la démarche de CASBEE for Urban Development.

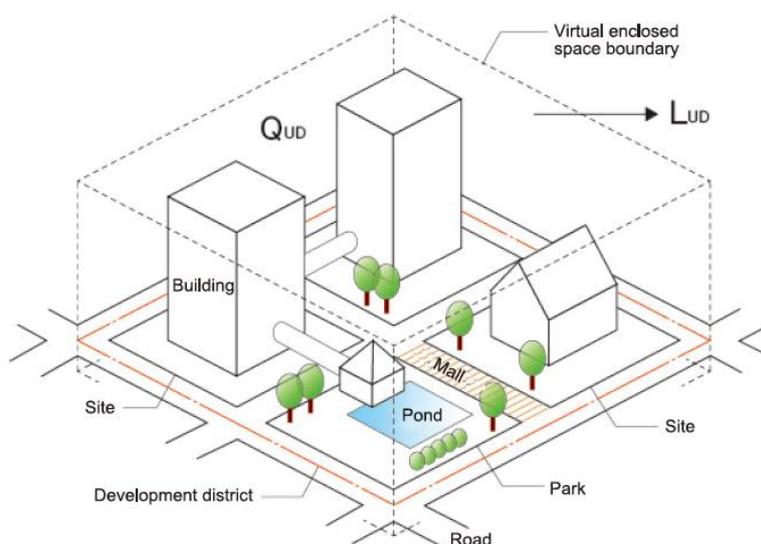


Figure 5 : – Méthodologie d'évaluation d'un projet par CASBEE for Urban Development (Source CASBEE)

La qualité environnementale du projet d'aménagement recouvre les trois dimensions du développement durable (environnement, société et économie) tandis que l'empreinte environnementale globale porte sur l'effort du projet en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Chacune de ces dimensions est d'abord évaluée et créditée séparément (Figure 6 – Notation du projet par sous-dimensions), puis le résultat final de l'évaluation repose sur le rapport entre les notes des deux dimensions permettant d'obtenir l'efficacité environnementale du projet (radar) (Figure 7).

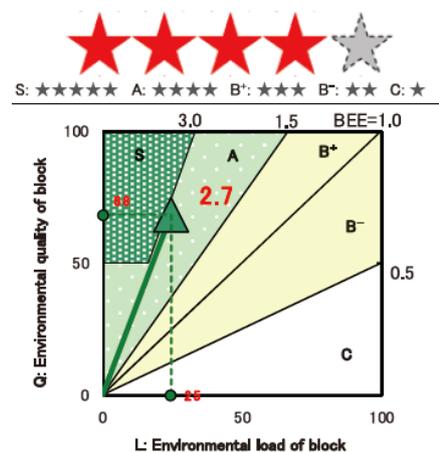
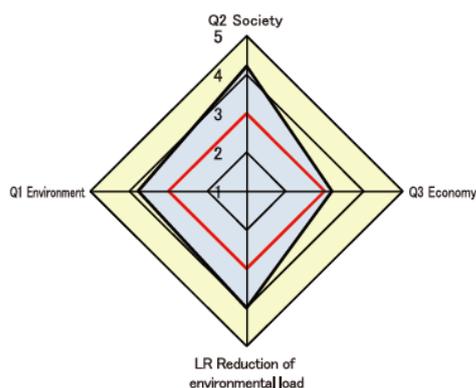


Figure 6 – Notation du projet par sous-dimensions (radar) Figure 7 – Efficience environnementale du projet

Pour évaluer le volume d'émissions de CO₂ et l'effort de réduction propre au projet d'aménagement, CASBEE s'appuie sur le guide pour le développement des villes à bas carbone [Manual for Low Carbon City Development] développé par le ministère de l'Environnement et le ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie du Japon. Trois contributeurs majeurs des émissions de CO₂ sont ainsi pris en compte dans l'évaluation de l'empreinte environnementale du projet : les transports et la mobilité, les bâtiments résidentiels et tertiaires, et la capacité d'absorption des émissions de CO₂ par les Green Tech et la végétalisation.

D'un point de vue plus général, la démarche CASBEE for UD s'exporte assez difficilement en-dehors du Japon, notamment du fait de nombreux critères sur la prise en compte des risques et de résilience qui sont liés aux spécificités du contexte japonais (tremblements de terre, typhons...).

3 L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE APPLIQUEE AUX PROJETS D'AMENAGEMENT ET AUX AUTRES ECHELLES TERRITORIALES

Le projet E+C- Quartier vise à développer une méthode d'évaluation quantifiée des impacts énergie et carbone des projets d'aménagement. Cette méthode se veut holistique et prendre en compte au maximum les spécificités du projet ainsi que l'environnement dans lequel il s'inscrit. L'approche par Analyse de Cycle de Vie répond à ce besoin car demande d'intégrer l'ensemble des phases de cycle de vie d'un projet (de l'extraction des matières premières à la fin de vie des produits).

Les normes ISO 14 040 et ISO 14 044 (ISO, 2006a, b) qui exposent les principes et lignes directrices de l'ACV définissent quatre phases pour une méthode en Analyse de Cycle de Vie :

- La phase de définition des objectifs et du champs de l'étude
- La phase d'inventaire de cycle de vie
- La phase d'évaluation
- La phase d'interprétation

Le présent paragraphe va analyser les objets existants en matière d'évaluation énergie carbone quantifiée à l'échelle des projets d'aménagement au travers de ces quatre phases de l'ACV. Les pratiques actuelles aux échelles de la planification territoriale et du bâtiment seront également passées aux cribles de ces quatre étapes.

3.1 La définition des objectifs et du champs de l'étude

3.1.1 La définition des objectifs

La définition des objectifs d'une étude est la première étape de l'évaluation. Les implications de cette étape se retrouvent dans les différentes phases de l'ACV : la définition du champs de l'étude, du périmètre d'évaluation et l'interprétation des résultats doivent se faire dans le cadre des objectifs fixés pour l'étude. Selon la norme ISO 14 044, « la définition des objectifs d'une ACV doit indiquer sans ambiguïté les éléments suivants :

- L'application envisagée ;
- Les raisons conduisant à réaliser l'étude ;
- Le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude ;
- S'il est prévu que les résultats soient utilisés dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public. » (ISO, 2006b)

3.1.2 Champs de l'étude

La définition du champ de l'étude est également une étape primordiale en ACV. Sur ce point, des travaux de VENTURA ont souligné d'une part, que les hypothèses et choix relatifs à la définition du champ de l'étude conditionnent fortement les résultats de l'ACV et d'autre part que les commanditaires de ces analyses sont rarement partie prenante dans la réalisation de ces choix. La norme ISO 14 044 fournit une liste des éléments devant être inclus dans la description du champ d'une étude ACV. Cette liste inclut notamment (ISO, 2006b) :

- La description du système à évaluer
- Les fonctions et frontières du système
- L'unité fonctionnelle

La norme ISO 14 044 définit la frontière du système comme l'« ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie du système de produits »(ISO, 2006b). La frontière d'évaluation d'un projet

urbain peut être interprétée comme la somme de trois périmètres :

- **Un périmètre spatial** : Le périmètre spatial définit sur quelle emprise géographique les activités doivent être prises en compte ;
- **Un périmètre fonctionnel** : Le périmètre fonctionnel définit les contributeurs à prendre en compte dans l'évaluation du projet urbain. Il peut s'agir de produits (produits de construction, ouvrage, ...) ou de services (consommation d'énergie). La description des frontières fonctionnelles de l'étude se fait donc aussi comme la liste des contributeurs à inclure.
- **Un périmètre temporel** : Le périmètre temporel définit la durée pendant laquelle les activités du territoire doivent être prises en compte dans l'évaluation

Un des grands enjeux de la méthode E+C- Quartier est de définir le périmètre fonctionnel de l'évaluation. Il est possible d'opposer schématiquement deux périmètres de comptabilisation des impacts :

- **Un périmètre basé sur la reconnaissance de la responsabilité du consommateur final**, dit périmètre « orienté consommateur » : Les impacts environnementaux associés à la fourniture de produits et services sont affectés aux utilisateurs finaux, en l'occurrence aux usagers du quartier dans le cas d'un projet d'aménagement.
- **Un périmètre basé sur la reconnaissance de la responsabilité du producteur**, dit périmètre « orienté producteur » : Les impacts environnementaux sont attribués aux territoires où les activités à l'origine de ces impacts sont situées, en l'occurrence au périmètre spatiale du quartier dans le cas d'un projet d'aménagement

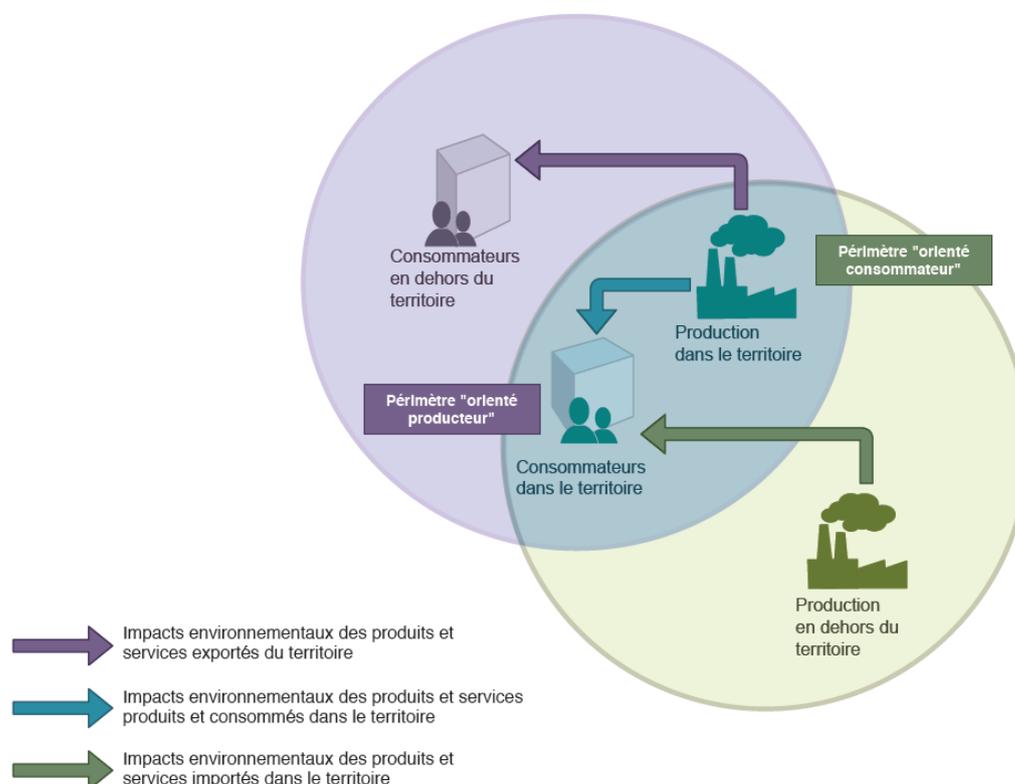


Figure 8 : Périmètre « orienté producteur » versus périmètre « orienté consommateur » (Source : Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC))

En vue d'alimenter la méthode E+C- Quartier, on peut citer différents travaux de la littérature proposant des périmètres fonctionnels adaptés aux échelles urbaines avec une approche périmétrique mixte entre «consommateur » et «producteur » :

- **Le périmètre de responsabilité totale** (Loiseau, 2014) : Loiseau suggère d'appliquer le principe de responsabilité totale. Celui-ci implique que l'ensemble des cycles de vie des activités de production et de consommation soit pris en compte, exceptés les impacts situés en aval du cycle de vie des activités de production. L'auteure suggère pour éviter les doubles comptages de présenter séparément les résultats d'impacts des activités de production et de consommation.
- **Le protocole relatif aux gaz à effet de serre des communautés (Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC))** (WRI, 2014) : Le GPC est un standard pour la comptabilité et la déclaration des émissions des gaz à effet de serre des villes et aires urbaines. La méthode du Bilan Carbone® scope 1, 2, 3 est GPC compatible. Le GPC distingue en effet les émissions qui se produisent physiquement dans la ville (périmètre 1) de celles qui se produisent en dehors de la ville mais qui sont générées par des activités se déroulant dans les limites de la ville (périmètre 3) de celles résultant de l'utilisation d'électricité, de vapeur, et d'énergie de chauffage et/ou refroidissement fourni par des réseaux qui peuvent ou non traverser les frontières de la ville (périmètre 2). Les émissions du périmètre 1 peuvent également être qualifiées d'émissions « territoriales » et équivaut donc au périmètre « orienté producteur » ou encore au scope 1 du Bilan Carbone
- **La norme britannique PAS 2070** (BSI, 2013) : La norme PAS 2070 spécifie les exigences relatives à l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre d'une ville ou d'un centre urbain. Cette norme met en avant deux périmètres d'évaluation. Le premier périmètre est le périmètre « orienté consommateur » déjà présenté précédemment. Le second périmètre d'évaluation défini dans la norme PAS 2070 est le « Direct Plus Supply Chain (DPSC) ». Le DPSC est un périmètre d'évaluation qui inclut toutes les émissions de gaz à effet de serre qui se situent dans les limites géographiques d'une ville, ainsi que dans les chaînes d'approvisionnement associées aux principaux produits et services de la ville : les déchets, gestion des eaux usées, la construction, l'alimentation et les transports.



Adélaïde MAILHAC analyse dans le chapitre 3 de sa thèse ces différents périmètres de la façon suivante :

Périmètres	Complexité de mise en œuvre	Objectif(s) d'atténuation mis en avant	Avantage	Inconvénients
Périmètre «orienté producteur »	Relativement peu complexe si l'évaluation est monocritère sur le changement climatique. Mais la mise en œuvre d'une évaluation multicritère est complexe et demande un lourd traitement des données environnementales.	Responsabilisation des activités qui génèrent les impacts environnementaux	Périmètre pénalisant les territoires fortement importateurs Favorise des actions globales pour réduire les impacts environnementaux	Une part des impacts à lieux en dehors du périmètre administré par les commanditaires
Périmètre «orienté consommateur»	Plutôt complexe d'obtenir des données spécifiques sur la consommation à l'échelle infra-nationale	Responsabilisation des consommateurs finaux	Origine des impacts environnementaux dans le périmètre administré par les commanditaires : proximité des acteurs permet un dialogue pour engager des actions de réduction des impacts.	Périmètre pénalisant les territoires qui exportateurs Transports internationaux mal pris en compte
GPC (Périmètres 1, 2, 3)	Plutôt complexe d'obtenir des données spécifiques sur la consommation à l'échelle infra-nationale Plutôt complexe car nécessite un découpage fin de l'information pour ne pas faire de double comptage des impacts	Le périmètre 1 met l'accent sur les activités qui génèrent les impacts. Le périmètre 2 met l'accent sur les activités ou acteurs consommateurs d'énergie. Le périmètre 3 porte la responsabilité sur les consommateurs finaux et intermédiaires.		
PAS 2070 (Direct Plus Supply Chain)	Plutôt complexe car nécessite un découpage fin de l'information pour ne pas faire de double comptage des impacts	Responsabilisation des activités qui génèrent les impacts environnementaux et une emphase sur les impacts indirects des activités et services de la ville : l'énergie, la construction...		

Figure 9 : Comparaison des périmètres fonctionnels pour l'évaluation d'un territoire (Mailhac, 2019)

3.2 Inventaire de cycle de vie

L'inventaire de cycle de vie consiste à faire l'inventaire des flux entrant et sortant du système (flux énergétique, matières, transport, etc...) qui peut donc être plus large que le périmètre géographique du quartier. Ces flux sont généralement agrégés en catégories semblables dites **contributeurs** qui répondent sur le système à une fonction commune (exemple : la mobilité). Dans la pratique la production de l'inventaire du cycle de vie est souvent assistée par **l'utilisation de logiciels** et bases de données dédiés. Etablir l'inventaire du cycle de vie ne nécessite alors que de connaître les procédés du système dits **de premier plan**. Les données de premier plan sont celles visibles par le porteur de projet (l'aménageur par exemple) et sur lesquelles il a un potentiel levier d'action (par exemple surface de plancher construite sur le projet). Il faut ensuite leur associer des données environnementales qui peuvent être issues de bases de données généralistes ou spécialistes ou encore issues de la littérature. Ces données environnementales peuvent embarquer des procédés de **second plan** non visible directement par le porteur de projet (Exemple : L'impact de la construction des infrastructures des réseaux électriques inclus dans l'impact lié à la consommation d'électricité du quartier).

Le paragraphe 4 de ce document (Analyse des outils existants) recense et analyse des outils permettant de réaliser cet inventaire de cycle de vie de manière adaptée aux projets d'aménagement. Il est proposé dans ce document un découpage arbitraire par contributeur, détaillé ci-après, permettant d'analyser et de comparer ces outils entre eux¹. Il s'agit d'une grille de découpage des impacts se prêtant bien à l'analyse des outils recensés dans ce document.

Les contributeurs retenus pour l'analyse des outils (paragraphe 4) sont donc regroupés de la façon suivante :

- Le contributeur « **Energies et Réseau** » incluant les impacts énergie carbone :
 - De la **consommation d'énergie en exploitation** évaluée annuellement pour l'opération d'aménagement en phase de vie. On considère ici l'énergie qui est physiquement consommée dans le périmètre de l'opération d'aménagement : Consommation des bâtiments, de l'éclairage public, etc... Les impacts énergie carbone de ce sous contributeur prendra en compte les impacts amonts de cette consommation énergétique
 - De **l'ACV des réseaux énergétiques** construits localement pour l'opération d'aménagement : Réseaux d'électricité, gaz et thermiques.
- Le contributeur « **Bâtiment** » incluant les impacts énergie carbone :
 - De **l'ACV des produits de construction des bâtiments** construits ou rénovés
 - Des consommations d'énergie et d'eau induits par **les chantiers**.
 - Des impacts de la **déconstruction** de bâtiments existants
- Le contributeur « **Service urbains** » incluant les impacts énergie carbone :
 - Des process liés à la **gestion de l'eau** : potabilisation, acheminement et retraitement de l'eau directement consommée par le projet en exploitation. On considère ici l'eau qui est consommée et rejetée dans le périmètre physique de l'opération d'aménagement évaluée en phase de vie : Arrosage des espaces verts, lavage, cuisine, ...
 - De l'ACV des **réseaux d'eau potable et d'assainissement** construit localement pour l'opération d'aménagement

¹ Ce découpage par contributeur défini dans ce document ne constitue pas le découpage définitif de la méthode E+C- Quartier qui n'est pas arrêté à ce jour



- Des process liés à la **gestion des déchets** à savoir le retraitement des déchets produits annuellement par les usagers de l'opération d'aménagement (ordures ménagères) et le transport de ces déchets.
- Le contributeur « **Aménagement des espaces extérieurs** » incluant les impacts énergie carbone :
 - De l'ACV des **de la construction des espaces extérieurs** dont éventuellement les produits de construction, la déconstruction et les impacts des chantiers.
 - Du phénomène de **stockage carbone** induits par le changement d'affectation des sols (végétations, sols non artificialisés).
- Le contributeur « **Mobilité des personnes et logistique** » incluant les impacts énergie carbone :
 - **Des déplacements quotidiens des usagers du quartier** (domicile-travail, achat, loisir, etc...). Sont comptabilisés au sein de ce sous-contributeur l'ACV des postes d'impact énergie carbone suivant au prorata des distances : Des carburants consommés , véhicules de transports utilisés (voitures, bus etc...), infrastructure de transport à l'échelle nationale.
 - **Des déplacements exceptionnels des usagers du quartier** : départ en vacances, déplacements professionnels à l'étranger, etc... Sont comptabilisés au sein de ce sous-contributeur l'ACV des postes d'impact énergie carbone suivant au prorata des distances : Des carburants consommés, véhicules de transports utilisés (voitures, bus etc...), infrastructure de transport à l'échelle nationale.
 - **Du transport de marchandise** induits par la consommation des usagers du quartier. Sont comptabilisés au sein de ce sous-contributeur l'ACV des postes d'impact énergie carbone suivant au prorata des distances : Des carburants consommés , véhicules de transports utilisés (voitures, bus etc...), infrastructure de transport à l'échelle nationale.
- Le contributeur « **Consommation** » incluant les impacts énergie carbone :
 - Des « **Biens de consommation** » induits par la consommation des biens achetés par les usagers du projet d'aménagement.
 - De l'« **Alimentation** » induits par la production nourriture (agriculture, transformation, conditionnement, conservation, ...) consommée par les usagers du projet d'aménagement.

Points de vigilance :

- Le découpage retenu ici pour l'analyse des outils induits potentiellement des doubles comptages d'impact dans l'évaluation d'un projet d'aménagement (exemple : L'impact de la construction des réseaux énergétiques comptabilisée localement dans le contributeur « Réseaux énergétiques » et de manière forfaitaire dans le contributeur « Consommation d'énergie en exploitation »). De manière plus général, la méthodologie E+C- Quartier devra se prévenir de doubles comptage. En effet la méthodologie a pour ambition d'une fois appliquée à l'ensemble des quartiers Français de retomber sur le total des émissions de GES ce qui est donc incompatible avec des doubles-comptages.
- La méthodologie E+C- Quartier se vaudra la plus holistique possible en allant même intégrer des contributeurs sur lesquels à priori un aménageur n'a pas ou peu de leviers d'actions : Déplacements exceptionnels, biens de consommation, alimentation. Etendre le périmètre à ces contributeurs est intéressant étant données les ordres de grandeurs induits par ces 3 contributeurs (plus de 50% des émissions de GES d'un Français moyen d'après l'étude BBKA Quartier). Cependant cela peut engendrer également un écueil dans lequel la méthode ne devra pas tomber : Etendre le périmètre d'évaluation peut amener à ne pas se focaliser sur les enjeux sur lesquels les utilisateurs d'E+C- Quartier ont un levier d'action direct.



3.3 La phase d'évaluation

En ACV, la phase d'évaluation des impacts du cycle de vie permet de traduire les données d'inventaire ou « **les quantitatifs** » en impacts sur l'environnement. De manière pratique, cela se fait en multipliant ces **quantitatifs** (Exemple : m³ d'eau potable consommée / an, kWh d'électricité consommée / heure, etc..) à des **données environnementales** associées. Le méthodologie « E+C- Quartier » a pour mission de traduire les impacts des projets d'aménagement selon deux indicateurs (ce qui n'empêche pas le calcul sur d'autres indicateurs) :

- Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) exprimées généralement en kg équivalent CO₂
- La consommation d'énergie primaire exprimée en kWh ou kJ

Pour transformer les quantitatifs d'un projet d'aménagement (qui sont les paramètres descriptifs de ce dernier) en impact, les méthodes d'ACV s'appuient sur **des bases de données environnementales**. Ces bases de données environnementales intègrent notamment les impacts environnementaux liés aux process d'arrière-plan. Ce paragraphe recense donc les principales bases de données existantes qui pourraient être exploitées pour la construction de la méthode « E+C- Quartier » (cette liste n'est pas exhaustive).

3.3.1 Base Carbone[®]

« *La Base Carbone est une base de données publiques de facteurs d'émissions nécessaires à la réalisation d'exercices de comptabilité carbone. Elle est administrée par l'ADEME, mais sa gouvernance est multi-acteur et son enrichissement est ouvert.* »² L'outil GES Opame (voir 4.1.1) permet par exemple d'exploiter cette base à l'échelle des projets d'aménagement. Les données de cette base sont structurées en 3 catégories suivant les périmètres définis dans la méthode du Bilan Carbone[®] (elle-même compatible avec le Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories, voir 3.1.2)

- Scope 1 (les émissions directes de GES),
- Scope 2 (les émissions de GES liées à la consommation d'électricité et de chaleur),
- Scope3 (les émissions indirectes de GES).

Le schéma ci-dessous synthétise la structure de cette base de données :

² Voir <http://www.bilans-ges.ademe.fr>



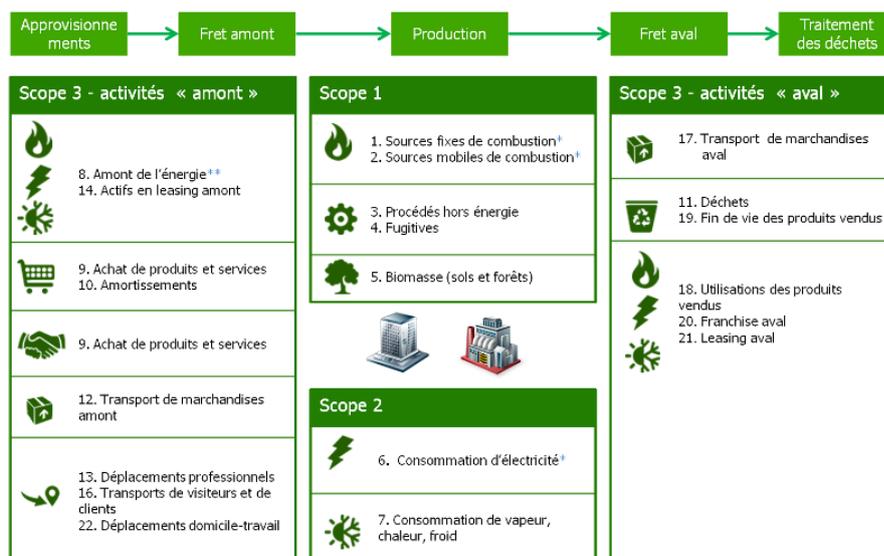


Figure 10 : Catégories de la base de données Base Carbone® (Source Ademe)

3.3.1 Base Ecoinvent

La base de données Ecoinvent³ met à disposition des inventaires du cycle de vie de différents procédés et produits couvrant tous les secteurs d'activité. Cette base de données suisse est reconnue mondialement comme étant la base de données de référence en ACV. La base contient une quinzaine de milliers de données environnementales (multi indicateurs : carbone, énergie primaire et autre). Des outils tels que Simapro, OpenLCA, Gabi, ou encore NovaEQUER permettent d'exploiter cette base de données.

3.3.2 Base GaBi

« La base de données GaBi représente la base environnementale la plus grande qui existe aujourd'hui sur le marché avec des règles de modélisation précises pour assurer leur homogénéité ; elle contient plus de 12.500 données d'inventaire prêtes à l'emploi. »⁴. La base de données construite par PE International, groupe de consultance spécialisé dans l'Analyse du Cycle de Vie, fournit une quantité importante d'inventaires de cycle de vie (multi indicateurs et multi sectoriels). Le groupe travaille particulièrement à l'exportation de cette base de données au niveau international. L'outil Gabi permet d'exploiter cette base de données.

³ Voir <https://www.ecoinvent.org/>

⁴ Voir <http://www.gabi-software.com/france/bases-de-donnees-acv/>

3.3.3 Base INIES

« Gérée de façon participative par les acteurs de la construction dont les Pouvoirs Publics, INIES est la base nationale française de référence sur les déclarations environnementales et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages. »⁵ Elle est constituée de Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES, données spécifiques à un produit de construction du bâtiment), de Profil Environnemental Produit (PEP, données spécifiques à un équipement du bâtiment) ou de données génériques environnementales mis à disposition par le ministère de la construction.

C'est la base utilisée pour l'expérimentation E+C- bâtiment. De nombreux outils existent aujourd'hui permettant d'exploiter la base INIES pour réaliser une ACV pour E+C- Bâtiment. On peut citer par exemple les premiers outils conformes au référentiel lors du lancement de l'expérimentation en 2017⁶: OneClick LCA, Elodie, NovaEQUER, ThermACV ou encore le module E+C- de Climawin.

3.3.4 Base IMPACTS

« La Base IMPACTS[®] est la base de données génériques d'inventaire officielle pour le programme gouvernemental français d'affichage environnemental des produits de grande consommation. »⁷ Cette base de données élaborée par l'ADEME permet notamment aux industriels de mettre en place et d'évaluer des démarches d'éco-conception. L'outil Bilan Produit permet d'exploiter cette base de données.

3.3.5 Comparaison et utilisation des bases de données recensées dans le cadre d'E+C- Quartier

	Base Carbone	Ecoinvent	GaBi	INIES	IMPACTS
Multi indicateurs environnementaux	Carbone uniquement	Oui	Oui	Oui	Oui
Spécialisation de la base	Multi sectoriel	Multi Sectoriel	Multi Sectoriel	Bâtiment	Produits de grande consommation
Outils exploitant la base	Bilan Carbone [®] GES Opame	Simapro NovaEQUER Gabi OpenLCA	GaBi	Elodie NovaEQUER	Bilan Produit

Figure 11 : Comparaison des différentes bases de données environnementales recensées

⁵ Voir <http://www.inies.fr/>

⁶ <http://www.inies.fr/la-liste-des-premiers-logiciels-en-conformite-avec-le-referentiel-de-l'experimentation-ec-publiee/>

⁷ Voir <http://www.base-impacts.ademe.fr/>

La base de données INIES est utilisée dans le référentiel E+C- Bâtiment, elle est spécialisée pour réaliser des ACV de bâtiments. A l'échelle du bâtiment, elle est très exhaustive sur les données d'impact relatifs aux contributeurs produits de construction. La construction de macro-données à partir de la base INIES utilisables plus facilement à l'échelle des projets d'aménagement pourrait bien se prêter à l'évaluation des produits de construction du contributeur Bâtiment pour la méthode E+C- Quartier. La base INIES est elle-même construite avec des modèles issus entre autres de la BDD EcoInvent pour la rendre plus opérationnelle aux projets de bâtiments.

A l'échelle du bâtiment, la base INIES est également relativement bien représentative sur les contributeurs Energie et réseaux énergétiques ainsi qu'Espaces extérieurs (produits de construction). Cependant INIES est beaucoup plus pauvre sur les autres contributeurs (services urbain, mobilité, consommation notamment) et ne sera donc pas suffisante à elle seule pour répondre à la méthodologie E+C- Quartier. Les bases de données multi sectorielles EcoInvent, Base Carbone ou GaBi ou encore la base plus spécialisée IMPACTS peuvent compléter le spectre des données environnementales manquantes dans INIES pour la construction de la méthodologie E+C- Quartier. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres sources de données environnementales pourront être utilisées.

A titre d'illustration, on peut citer le travail du groupement C40 retranscrit dans le rapport Consumption-Based GHG Emissions of C40 cities. En effet, ce rapport en plus d'illustrer l'application de l'évaluation des émissions de GES de 79 villes sur la base du standard GPC (cf paragraphe 3.1.2), illustre également l'approche en ACV « économique ». Cette approche permet d'estimer les émissions de gaz à effet de serre de certaines activités et services lorsque l'on ne dispose pas de données environnementales directes ou de connaissances précises de certains éléments du système que l'on souhaite évaluer. Pour évaluer les émissions liés au scope 3 des villes, le groupement C40 applique en effet des contenus en kgeqCO2/€ reconstruits après analyse des comptabilités économiques nationales et carbone par secteur (notamment via des modèles réalisés par le Global Trade Analysis Project). C'est également l'approche qui est utilisée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire pour calculer l'empreinte carbone des français tous usages, en incluant les émissions des importations et en excluant les émissions des exportations.

3.4 Interprétation

L'interprétation des résultats est une étape essentielle quelle que soit l'évaluation réalisée.

Selon la norme ISO 14 044 l'étape d'interprétation comprends les éléments suivants (ISO, 2006b) : «

- L'identification des enjeux significatifs basée sur les résultats de l'évaluation ;
- La vérification des principales données de l'évaluation via des contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence ;
- Des conclusions, limitations et recommandations ;
- S'il est prévu que les résultats soient utilisés dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public. »

La méthode d'évaluation développée par E+C- Quartier cherchera à répondre à différents objectifs d'interprétation des résultats comme par exemple :

- Connaître les ordres de grandeurs d'impact des différents contributeurs d'impact du projet afin de sensibiliser les différents acteurs associés au projet (financeurs, décideurs, concepteurs, constructeurs et usagers).
- Comparer les impacts induits par le projet à des objectifs de transition écologique plus globaux (trajectoires carbone mondiales, nationales, régionales, etc...)

- Eclairer les décisions de conception sur leurs poids carbone et énergétiques lors des phases amonts des projets d'aménagement afin d'encourager la mise en place de leviers d'action pertinents du point de vue environnementale.

L'utilisation d'une unité fonctionnelle unique permet de standardiser les résultats de sortie d'une évaluation et ainsi faciliter l'interprétation des résultats et la comparaison à des valeurs de référence. LOTTEAU⁸ liste les principales unités dites de référence utilisées pour exprimer les résultats d'ACV de quartier :

- Le nombre d'habitants
- Le m² de surface de plancher de bâtiment
- Le m² de surface au sol du quartier
- Une combinaison de ces 3 unités fonctionnelles

Le méthode E+C- Quartier initie une démarche innovante pour la création d'une nouvelle unité fonctionnelle à savoir : **l'usager**. L'approche par usager pourrait ainsi permettre d'interpréter les résultats obtenus sur un projet en lien avec des objectifs de transition écologique plus globaux (trajectoires carbone mondiales, nationales, régionales, etc...) tout en permettant de répondre à de nombreux obstacles méthodologiques (variétés des unités fonctionnelles par service, périmètre physique et périmètre d'influence). Ce travail s'inscrit dans la continuité d'une première étude intitulée « BCCA Quartier : Vers le quartier bas carbone » et réalisée par le CSTB et Elioth pour le compte de l'association Bâtiment Bas Carbone.

3.5 Analyse de cycle de vie appliquée aux autres échelles territoriales

Si à l'échelle des projets d'aménagement, aucune méthode de quantification des impacts énergie carbone quartier ne s'est encore imposée dans les projets à travers une approche standardisée (label, une certification, une norme ou une méthode déposée[®] ou référentiel technique reconnu), il en est autrement à des échelles spatiales plus fines ou plus larges :

- **A l'échelle de la planification territoriale**, la méthode du Bilan Carbone[®] est utilisée pour évaluer les Plans Climat Air Energie Territorial (PCAET)
- **A l'échelle du bâtiments ou de la parcelle**, la méthode E+C- Bâtiment (repris également dans les labels Effinergie, BCCA et par la certification HQE) pour évaluer la conception des projets de construction neuves.

A noter que le changement d'échelle du bâtiment au projet d'aménagement impliquera notamment deux choses :

- Des effets systémiques induits par les interactions et mutualisations entre bâtiments par exemple : Les effets d'ilots de chaleurs ou encore la mixité d'usage ayant un impact sur le transport.
- La granularité des données d'entrée et des résultats en sortie d'évaluation devra être adapté aux données disponibles lors des phases d'évaluations retenus.

⁸ Thèse Marc Lotteau (2017)



3.5.1 Echelle de la planification territoriale

Il existe à l'échelle **de la planification territoriale** une obligation légale d'adopter un Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET) pour les Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) de plus de 20 000 habitants. D'après la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV, 2015), un calcul des émissions de GES selon la méthode Bilan Carbone[®] doit être réalisé dans le cadre de ces PCAET. Ce bilan doit obligatoirement inclure les scope 1 de la méthode (émissions directes des sources fixes - bâtiments, process, agriculture - et mobiles du territoire) ainsi que le scope 2 (émissions liées à la production d'électricité, chaleur ou vapeur en lien avec les activités du territoire). Le scope 3 reste optionnel bien que recommandé. Le rapport de l'ABC (Association Bilan Carbone) Bonnes pratiques des territoires en faveur du climat – Enquête 2017 résume les principales observations de la pratique des bilan carbone dans le cadre des PCAET.

A titre illustratif, la méthode d'évaluation Bilan Carbone[®] (exigée par la LTECV dans les PCAET) peut être analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV. Cette analyse est présentée dans le tableau suivant :

Champs de l'étude (Périmètre)	Evaluation des émissions de GES Scope 1 et 2. Le scope 3 est demandé à titre facultatif
Inventaire de cycle de vie (Outils utilisé)	Bilan Carbone [®] , Observatoire régional
Phase d'évaluation (Bases de données environnementales)	Base Carbone
Interprétation	Se comparer à des objectifs de la LTECV Exemple ⁹ : Objectif 2020 : -20 % (en cohérence avec les objectifs fixés aux niveaux européen et national),

Figure 12 : La méthode d'évaluation Bilan Carbone[®] exigée par la LTECV analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV

⁹ Voir page 19 le rapport de l'ABC (Association Bilan Carbone) Bonnes pratiques des territoires en faveur du climat – Enquête 2017

3.5.2 Projets de construction ou rénovation à l'échelle du bâtiment ou de la parcelle

A l'échelle du bâtiment ou de la parcelle, le référentiel E+C- Bâtiment, paru en fin 2016, demande d'évaluer la performance énergétique et carbone de projets de construction neuve. Le référentiel E+C- préfigure la prochaine réglementation thermique et environnementale de 2020 du bâtiment (RE2020). La méthode E+C- Bâtiment est actuellement en cours de révision par un groupes d'experts et de concertation de la DHUP, ainsi certains ajustements devraient voir le jour d'ici la sortie de la RE2020.

De plus, l'obtention du label E+C- est obligatoire pour l'obtention d'un label BBCA, Effinergie 2017 qui reprenne en partie de la méthodologie E+C- bâtiment. C'est également la méthode exigée par le référentiel HQE Bâtiment.

- **La méthode E+C- Bâtiment**

Le référentiel E+C- Bâtiment demande aux projets de construction neuves sujets à une labellisation l'évaluation des contributeurs suivant¹⁰ sur 50 ans :

- La consommation d'énergie en exploitation (indicateurs du référentiel **Bilan BEPOS** en énergie primaire et **EGES « Energie »** en kgeqCO₂). Cette évaluation est notamment basée sur la méthode réglementaire de la réglementation thermique pour les usages conventionnels de l'énergie dans les bâtiments. Des valeurs forfaitaires au m²/an sont imposées pour calculer la consommation des autres usages de l'énergie.

Concernant la comptabilisation de l'électricité produite localement et autoconsommée, cette dernière permet dans le référentiel de diminuer le Bilan BEPOS de l'opération en bénéficiant d'un coefficient de 2,58 (énergie finale vers énergie primaire). L'électricité produite localement mais exportée est calculée en prenant un coefficient de conversion égal à 1 (à l'exception des 10 premiers kWh/m²/an qui bénéficie également du coefficient 2,58).

- Les produits de construction de bâtiments et systèmes de production d'énergie (indicateur du référentiel **EGES « Produits de construction et équipements »**). Cette évaluation prend en compte l'impact en ACV de l'ensemble des composants du bâtiments, et demande l'utilisation des données environnementales de la base INIES (FDES ou de PEP).
- Le chantier de construction du bâtiment (indicateur **EGES « chantier »**) qui évalue les consommations d'énergie du chantier, les consommations et rejets d'eau du chantier ainsi que la gestion des déchets de terrassement.
- La gestion de l'eau (indicateur **EGES « eau »**). La consommation d'eau sur le site est calculée à partir du nombre d'occupants et un coefficient de modulation est calculé selon le type d'équipements de plomberie installés sur le bâtiment.

A titre illustratif, la méthode E+C- bâtiment peut être analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV. Cette analyse est présentée dans le tableau suivant :

¹⁰ Voir référentiel technique E+C- : <http://www.batiment-energiecarbone.fr/>



Champs de l'étude (Périmètre)	Evaluation sur 50 ans des émissions de GES et de la consommation d'énergie primaire sur le contributeur <u>Consommation d'énergie en exploitation</u> Evaluation sur 50 ans des émissions de GES uniquement sur les contributeurs : <u>Produits de construction et équipements, Chantier, Eau</u>
Inventaire de cycle de vie (Outils utilisés)	OneClick LCA, Elodie, NovaEQUER, ThermACV, le module E+C- de Climawin, ... (liste non exhaustive)
Phase d'évaluation (Bases de données environnementales)	Base INIES
Interprétation	Niveau E Niveau C

Figure 13 : La méthode d'évaluation E+C- bâtiment analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV

- **Le label BBCA**

L'association pour le Développement du Bâtiment Bas Carbone (BBCA) a mis au point un référentiel qui mesure l'empreinte carbone selon l'ensemble de son cycle de vie (principe de l'ACV) d'un bâtiment : Construction, exploitation et fin de vie. L'application de ce référentiel à des projets de construction neuve ou de réhabilitation de projets de logements collectifs ou tertiaire permet la délivrance du label BBCA.

La méthode de quantification des émissions de GES du référentiel BBCA¹¹ suit la méthode du référentiel E+C- Bâtiment sur la plupart des contributeurs à évaluer. Il demande en plus de comptabiliser certains aspects de la construction supplémentaires comme la **déconstruction ou la prise en compte du stockage carbone dans les matériaux biosourcés**. Autre différence avec le label E+C-, une déclinaison du label BBCA existe pour les opérations de rénovation. Enfin le référentiel BBCA demande une évaluation qualitative des projets au travers d'une **évaluation des innovations climats**. Cette dernière est réalisée par un système de checklist à points. Le référentiel encourage ainsi les innovations mettant en œuvre des leviers d'action de l'économie circulaire dans les projet.

¹¹ Voir Référentiel BBCA V3.0 et BBCA Rénovation 1.0

- **Le label Effinergie**

L'association Effinergie a mis au point un référentiel qui évalue la performance énergétique d'un projet de construction ou rénovation de bâtiment. La méthode implémentée dans le référentiel évalue en énergie primaire et en émissions de gaz à effet de serre les contributeurs suivant des projets¹² :

- La consommation d'énergie en exploitation calculé selon méthodologie E+C-
- Les déplacements quotidiens : Ce contributeur est évalué avec l'outil **Effinergie Ecomobilité** (développé en partenariat avec le CSTB)¹³. L'outil calcul les émissions des occupants du bâtiment (suivant leur nombre et profil) dans leur mobilité quotidienne en prenant en compte le contexte urbain (Centre, Banlieue, Pôles secondaires, rural), la distance à des aménités de proximité (Ecoles, collège, lycée, achats, loisir) et l'accessibilité du site aux mode doux et aux transports en commun (Bon, moyen, faible). L'outil calcule ensuite sur la base de données statistiques (Enquêtes Nationales Transport et Déplacements et Enquêtes Ménages Déplacements) des distances parcourus et des parts modales utilisées. Les données environnementales utilisées sont issues de la base Ecoinvent 2.2 retraitée sous la base de données SLCA (Eco_2004)

- **La certification HQE Bâtiment**

La certification HQE bâtiment demande l'application de la méthode E+C- Bâtiment aux opérations neuves. Il existe également une déclinaison du référentiel pour les opérations de rénovation qui demande la réalisation d'une ACV sur les produits de construction et le calcul des consommations énergétiques selon la méthode réglementaire RT existant.

¹² Voir règles techniques label Effinergie + et Label BBC-Effinergie Rénovation

¹³ Voir <http://www.effinergie-ecomobilite.fr/>



4 ANALYSE DES OUTILS EXISTANTS

Le choix **des outils** recensés et analysés dans ce document s'est porté sur des outils s'appliquant directement à l'échelle des projets d'aménagement et sur lesquels il existait suffisamment de littérature disponible pour les décrire et les analyser (articles scientifiques ou documentations techniques d'outils). L'analyse développée dans ce paragraphe porte :

- Sur les outils existants permettant de réaliser des **Analyse de Cycle de Vie (ACV)** adaptés spécifiquement à des projets d'aménagement.
- Sur les outils existants **de calculs dynamiques des consommations énergétiques des bâtiments (SED) à l'échelle quartier**. En effet, il s'agit d'outils encore très peu déployés opérationnellement dans les projets d'aménagement, à ce stade plutôt limités au domaine de la recherche. Cependant l'utilisation de ces outils pourrait être pertinente pour une meilleure appréhension des consommations d'énergie en exploitation et des puissances mises en jeu dans les projets de quartiers et ainsi simuler la mise en place de certains leviers d'actions dans les projets.
- Sur les travaux existants tâchant de prendre en compte **les aspects de changement comportemental** dans les méthodes d'évaluation d'impact environnementaux. Ce paragraphe ouvre certaines pistes de réflexions et d'investigation en vue d'alimenter la construction de la méthode E+C- Quartier

Les outils de type LUTI¹⁴ (Land Use Transportation Interaction Modeling, comme par exemple Transcad ou Mobisim), n'ont pas été retenus dans le périmètre de ce document car ils sont jugés non adaptés à des projets d'aménagement. En effet il s'agit d'outils lourds à mettre en place d'un point de vue opérationnel car ils nécessitent des données externes au projet (contextuelles) trop nombreuses à collecter et saisir (réseaux de transport du milieu urbain dans lesquels est inscrit le projet, tracé de routes externe au projet, ...).

4.1 Outils d'évaluation ACV multi contributeurs adaptés à l'échelle des projets d'aménagement

Le paragraphe de ce document analyse les outils existants adaptés à des projets d'aménagement permettant d'évaluer leurs émissions de gaz à effet de serre et de consommation énergétique. Les outils d'évaluation retenus sont tout d'abord des outils d'évaluation en ACV multi-contributeurs analysés selon les contributeurs définis dans le paragraphe 3.2 de ce document. Les quatre outils retenus pour cette analyse sont les suivant :

- GES Opam - Cerema, Ademe
- Nest - NOBATEK, INEF4
- NovaEQUER - Izuba, CES Mines ParisTech
- Urban Print - Efficacity, CSTB

Pour chacun de ces outils les informations suivantes sont décrites dans un tableau récapitulatif d'analyse :

¹⁴ Voir le rapport Approche intégrée et multicritères de la modélisation territoriale, éléments de cadrage pour la gestion des données territoriales (ADEME 2016) où les principaux outils existants de type LUTI sont recensés.



- **Les contributeurs évalués avec :**
 - o **Le ou les quantitatifs** à renseigner dans l'outil
 - o **La méthode d'évaluation des quantitatifs** proposée dans l'outil pour aider l'utilisateur à évaluer les quantitatifs d'entrée
 - o **Les données environnementales** utilisées dans l'outil pour calculer à partir des quantitatifs les émissions de gaz à effet de serre ou consommation d'énergie primaire du projet
- **Le type d'utilisation visée**
- **Les interactions recensées avec d'autres outils existants**
- **Les modes de traitement des données d'entrée** proposés par l'outil
- **Les cas d'étude** recensés dans la littérature à disposition
- **Les développements connus en cours**

4.1.1 GES Opam - Cerema, Ademe

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		GES Opam		
Développé par		Cerema		
Début du développement		2008		
Date de mise à jour		2019		
Contributeurs évalués		Quantitatifs associés	Méthode d'évaluation des quantitatifs	Données environnementales
Energies et réseaux	Consommation d'énergie en exploitation	kWh _{EF}	Ratio /m ² selon programmation, label visés (RT -x%), et zone climatique Ratio par occupant (élec spécifique) Ratio / linéaire de route	Base Carbone [®] Ademe
	Réseaux énergétiques	Linéaire de réseaux (gaz, chaleur)		Base Carbone [®] Ademe
Bâtiments	Produits de construction	m ² Surface Hors Œuvre brut		Selon mode constructif et usage (Base Carbone [®] Ademe)
	Chantier de déconstruction	m ² à démolir		Base Carbone [®] Ademe
Services urbain	Réseaux d'eau	Linéaire de réseaux d'eau		Base Carbone [®] Ademe
Aménagement des espaces extérieurs	Construction	m ² d'espaces extérieurs ou longueur de voirie		Selon type d'espaces (Base Carbone [®] Ademe)
	Puit carbone	m ² Surfaces végétalisées		Selon type d'espaces (Base Carbone [®] Ademe)
Mobilité des personnes et logistique	Déplacements quotidiens	Distances parcourues par an et par mode	Ratio / occupants selon l'usage, le type de site (centre, périurbain, etc...), l'accessibilité aux modes doux, aux transports et aux aménités	Selon mode de transport (Base Carbone [®] Ademe)

Type d'utilisation visée	AMO DD Aménagement (aide à la décision), sensibilisation
Interaction avec d'autres outils	Non
Mode de traitement des données d'entrée	Saisie manuelle dans l'outil
Cas d'étude	ZAC Les Fontaines (Mézières-Sur-Seine dans le 78, 2014) Landudec (Finistère, 2014)
Développements autres en cours	Développement d'une version 2, GES Urba en cours à prévoir en 2019

- **Description de l'outil :**

GES Opam est un outil d'évaluation des émissions de GES des projets d'aménagement. L'outil met en œuvre la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME sur ces types de projets. Il est l'unique outil identifié dans ce document évaluant les contributeurs déconstruction et puits carbone. L'outil GES Opam va faire l'objet d'une mise à jour en 2019 vers le nouvel outil en cours de développement GES URBA. Ce dernier opérera à la fusion des outils actuels GES Scot, GES PLU et GES OpAm pour créer un unique outil adressant l'ensemble de ces échelles.

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sous tirées des sources suivantes :

- Le [Guide technique GES Opam](#) en libre accès décrivant les hypothèses utilisées dans l'outil

4.1.2 Nest - NOBATEK, INEF4

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		Nest		
Développé par		NOBATEK, INEF4		
Début du développement		2011		
Date de mise à jour		2019		
Contributeurs évalués		Quantitatifs associés	Méthode d'évaluation des quantitatifs	Données environnementales
Energies et réseaux	Consommation d'énergie en exploitation	kWh _{EF} Surface PV	Ratio /m ² selon programmation, systèmes HVAC, âge et label visés (RT -x%), morphologie urbaine (compacité, ...) et zone climatique	Selon vecteur énergétique (Ecoinvent et BDD internes Nobatek/INEF4)
	Réseaux énergétiques	Linéaires de réseaux de chaleur		Ecoinvent et BDD internes Nobatek/INEF4
Bâtiments	Produits de construction	m ² SDP	Saisie par l'utilisateur ou calculé à partir de la modélisation 3D ou SIG	Selon mode constructif et usage (BDD internes Nobatek/INEF4 construites à partir FDES/PEP)
	Chantier Déconstruction	m ² SDP	Saisie par l'utilisateur ou calculé à partir de la modélisation 3D ou SIG	BDD internes Nobatek/INEF4
Services urbains	Gestion de l'eau	- Volume eau potable - Volume d'eau de pluie à traiter	Ratio /m ² ou /occupants	BDD internes Nobatek/INEF4 et ecoinvent
	Réseaux d'eau			

	Gestion des déchets	- Tonnage déchets - Distance centres de tri	Ratio /m2 ou /occupants	BDD internes Nobatek/INEF4 et ecoinvent
Aménagement des espaces extérieurs	Construction	m ² d'espaces extérieurs	Saisie par l'utilisateur ou calculé à partir de la modélisation 3D ou SIG	Selon type d'espaces (Ecoinvent ou INIES)
Mobilité des personnes et logistique	Déplacements quotidiens	Distances parcourues par an et par mode	Ratio /m ² selon nombre et profils d'occupants et selon distances aux services de proximités	Selon mode de transport (Ecoinvent)
Type d'utilisation visée	AMO DD Aménagement (aide à la décision), sensibilisation			
Interaction avec d'autres outils	Interface Web développée sur la plateforme EEGLE			
Mode de traitement des données d'entrée	Saisie manuelle interface web (pour l'ensemble du projet d'aménagement) Intégration maquette 3D (ifc, skp, ...) et import de fichiers SIG Lien automatique avec open data INSEE et autres BDD de référence (en cours de développement)			
Cas d'étude	?			
Développements autres en cours	?			

- **Description de l'outil :**

L'outil Nest développé par NOBATEK/INEF4 vient de faire l'objet en 2018 d'une refonte logiciel sous la plateforme de manipulation de données EEGLE. À la suite de cette refonte, Nest est désormais bien avancé en termes de manipulation de données d'entrée (prise en compte de fichiers SIG ou maquette 3D) qui lui permet de bien s'adapter aux différentes phases des projets d'aménagement. Nest intègre notamment des ratios de calculs de consommation énergétique des bâtiments prenant en compte des caractéristiques de morphologie urbaine.

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sous tirées des sources suivantes :

- L'état de l'art de la thèse Marc Lotteau (2017)
- Diaporama de présentation de Nest au Séminaire HQE Performance quartier (décembre 2018)
- Sources internes Nobatek/INEF4

4.1.3 NovaEQUER - Izuba, CES Mines ParisTech

- Tableau récapitulatif d'analyse :

Nom de l'outil		NovaEQUER		
Développé par		Izuba, CES Mines ParisTech		
Début du développement		1995		
Date de mise à jour		2019		
Contributeurs évalués		Quantitatifs associés	Méthode d'évaluation des quantitatifs	Données environnementales
Energies et réseaux	Consommation d'énergie en exploitation	kWh _{EF}	Simulation Pleiades+Comfie	Selon vecteur énergétique (Ecoinvent ou INIES)
	Réseaux énergétiques	- Linéaire réseaux urbains		Ecoinvent ou INIES
Bâtiments	Produits de construction	Suivant les composants	Calculé de manière détaillé à partir de la modélisation 3D	Ecoinvent ou INIES
	Chantier de construction	- Durée du chantier - Volume terre excavée	- Ratio /m ² SDP pour le calcul de volume terre excavée	Ecoinvent ou INIES
Services urbains	Gestion de l'eau	- Volume eau potable - Volume d'eau de pluie à traiter	Ratio / type d'occupants Ratio / types d'éléments de plomberie	Selon process traitement (Ecoinvent)
	Réseaux d'eau	- Linéaire réseaux eaux		Ecoinvent ou INIES
	Gestion des déchets	- Tonnage déchets - Distance centres de tri	Ratio /occupants	Selon process traitement (Ecoinvent)
Aménagement des espaces extérieurs	Construction	m ² d'espaces extérieurs		Selon type d'espaces (Ecoinvent)
Mobilité des personnes et logistique	Déplacements quotidiens	Distances parcourues par an et par mode	Type de site (urbain, rural, banlieue, etc...) Distances aux aménités et aux transports	Selon mode de transport (Ecoinvent)
Type d'utilisation visée		AMO DD Bâtiments et aménagement, calcul E+C- Bâtiment		
Interaction avec d'autres outils		Logiciel distribué par IZUBA existant Lié à Comfie Pleiade (intégré à la suite logicielle)		
Mode de traitement des données d'entrée		Saisie graphique dans l'interface		
Cas d'étude		Cluster Descartes, Champs-Sur-Marne (Thèse G. Herfray, 2011)		
Développements autres en cours		Travaux de recherches sur l'ACV Quartier en cours au CES Mines		

- Description de l'outil :

NovaEquer a pour but initial de réaliser des ACV bâtiments. Il est l'outil identifié dans ce document qui évalue les contributeurs le plus exhaustivement possible. Cependant cet outil demande un paramétrage détaillé et spécifique à chaque bâtiment ce qui le rend peu opérationnel sur des phases amont des projets d'aménagement. Les consommations d'énergie en phase exploitation sont calculées à partir du logiciel STD Bâtiment Pleiades+Comfie (compris dans la même suite logicielle). Sur des phases plus avancées des projets, par exemple lorsqu'un plan guide ainsi que des esquisses de bâtiments sont disponibles, cet outil peut plus facilement être utilisé.

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sous tirées des sources suivantes :

- La documentation technique de l'outil en libre accès sur le site d'Izuba (<http://docs.izuba.fr/>)
- L'état de l'art de la thèse Marc Lotteu (2017)

4.1.4 Urban Print - Efficacy, CSTB

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		Urban Print		
Développé par		Efficacy, CSTB		
Début du développement		2014		
Date de mise à jour		2019		
Contributeurs évalués		Quantitatifs associés	Méthode d'évaluation des quantitatifs	Données environnementales
Energies et réseaux	Consommation d'énergie en exploitation	kWh _{EF}	Ratio /m ² selon programmation Couplage automatisé avec PowerDis (en cours de développement)	Selon vecteur énergétique (Ecoinvent BDD internes Efficacy)
Bâtiments	Produits de construction	m ² SHON	Couplage modélisation volumétrique avec Powerdis (en cours de développement)	Selon mode constructif et usage (HQE Perf et UrbanIES en cours de développement)
Services urbains	Gestion de l'eau	- Volume eau potable	Ratio /m ² ou /occupants	Selon process traitement (Ecoinvent et BDD internes Efficacy)
	Réseau d'eaux	- Volume eau usée		
Services urbains	Gestion des déchets	- Tonnage déchets - Distance centres de tri	Ratio /m ² ou /occupants	Selon process traitement (Ecoinvent BDD internes Efficacy)
	Aménagement des espaces extérieurs	Construction	m ² d'espaces extérieurs	Selon type d'espaces (Ecoinvent ou INIES)
Mobilité des personnes et logistique	Déplacements quotidiens	Distances parcourues par an et par mode	Ratio /m ² SDP ou occupant selon programmation	Selon mode de transport (Ecoinvent)
Type d'utilisation visée		AMO DD Aménagement (aide à la décision), sensibilisation		

Interaction avec d'autres outils	Couplage avec PowerDis en cours de définition (Pour calcul des quantitatifs Bâtiments, Energies et réseaux énergétiques)
Mode de traitement des données d'entrée	Saisie manuelle interface web Import fichier externe SIG, CSV, ... (en cours de développement)
Cas d'étude	Marne Europe (Appel d'offre Inventons la métropole, 2017)
Développements autres en cours	Modélisation stockage Electrique, Base UrbanINIES, levier d'action lié à l'économie circulaire des déchets du BTP, Mobilité ville moyenne

- **Description de l'outil :**

Urban Print est développé par Efficacy et le CSTB et a fait l'objet en 2018 de la mise en ligne d'une première application web. Plusieurs développements sont en cours actuellement. Par exemple un travail de création de macro-composants à partir de la base INIES afin de mieux prendre en compte le contributeur bâtiment de manière adaptée à l'échelle des projets d'aménagement (constitution d'une base UrbanINIES). D'autres travaux sur la gestion de fichiers SIG en données d'entrée, sur le couplage d'Urban Print avec PowerDis (outil SED quartier) pour calculer les consommations d'énergie en exploitation et les quantitatifs produits de construction des bâtiments ou encore l'affinage de la prise en compte de la mobilité dans les villes de taille moyennes sont en cours.

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sont tirées de sources suivantes :

- Sources internes Efficacy
- Diaporama de présentation d'Urban Print au Séminaire HQE Performance quartier (décembre 2018)

4.2 Outils de calcul dynamique des consommations d'énergie en exploitation à l'échelle des projets d'aménagement

A l'échelle du bâtiment, les approches de simulation énergétiques dynamiques avec l'utilisation de logiciels dédiés sont aujourd'hui démocratisées. A l'inverse, à l'échelle des projets d'aménagement, les outils de simulation énergétique dynamique existants sont quant à eux récents et restent encore souvent cantonnés aux champs d'action de la recherche. Pour évaluer les consommations énergétiques des projets d'aménagement, les bureaux d'études actuels utilisent aujourd'hui généralement des approches d'une part statiques et d'autre part forfaitaires en utilisant des ratios de consommation annuelles surfacique (kWh/m²) par type de bâtiment. L'utilisation de ratios statiques permet de bien situer les ordres de grandeur de consommation énergétique et donc d'impact énergie carbone mais ne permet pas d'étudier finement certains phénomènes (et leviers d'action). À l'inverse, l'application d'une approche énergétique dynamique plus précise que les ratios statiques à l'échelle des projets d'aménagement permettent :

- De mieux prendre en compte le phénomène de foisonnement énergétique et ainsi mieux dimensionner les infrastructures énergétiques d'un projet (réseau de distribution électrique, réseaux de chaleur ou de froid)
- Etudier des effets de transfert énergétique entre bâtiments (chaud ou froid) permis par exemple avec la mise en place de boucles tempérées sur un projet
- Etudier des stratégies de flexibilité (effacement, stockage) permettant d'optimiser le bilan carbone d'un projet vis-à-vis d'un contenu CO₂ dynamique de l'électricité par exemple
- Etudier des scénarios d'évolution comportementales ou climatiques.

Les outils retenus spécifiquement dans ce paragraphe sont donc des outils permettant un calcul dynamique multi-vecteur des consommations énergétiques (et non simplement un calcul de besoin) des bâtiments sur un quartier et pour lesquels il existait suffisamment de littérature disponible pour les décrire et les analyser (articles scientifiques ou documentations techniques d'outils). Ce sont des outils développant des approches dites « bottom-up » de modélisation, c'est-à-dire décrivant séparément des systèmes unitaires agrégés ensemble pour constituer un modèle de quartier. Six outils ont été retenus pour cette analyse :

- City Energy Analyst - EPFL, Singapore ETH Centre, ETH Zürich, Future Cities Laboratory
- CitySim Pro - EPFL
- Pleiades+Comfie - IZUBA, CES Mines ParisTech
- PowerDis (Dimosim) - Efficacity, CSTB
- Smart-E - CES Mines ParisTech
- UMI - MIT, CCES National Science Foundation EFRI_SEED

Pour chacun de ces outils les informations suivantes sont décrites dans un tableau récapitulatif d'analyse :

- **Le mode de modélisation :**
 - o **Des bâtiments :** Le modèle d'échanges thermiques, la modélisation des systèmes HVAC dans les bâtiments, la modélisation de l'éclairage intérieur
 - o **Des réseaux thermiques :** Possibilité de modéliser les réseaux de gaz, et les réseaux de chaleur, de froid ou tempérée, avec ou sans stockage thermique
 - o **Des systèmes électriques :** Possibilité de modéliser du photovoltaïque (PV), de la cogénération, des éoliennes, du stockage électrique, du réseau de distribution
 - o **Des masques solaires**
 - o **De l'occupation :** apport internes métaboliques et usages de l'électricité spécifique
- L'existence d'une **interface utilisateur**
- Le **type d'utilisation visée de l'outil**
- Les **interactions recensées avec d'autres outils existants**
- Les **modes de traitement des données d'entrée** proposés par l'outil
- Les **cas d'étude** recensés dans la littérature à disposition
- Les **développements connus en cours**



4.2.1 City Energy Analyst - EPFL, Singapore ETH Centre, ETH Zürich, Future Cities Laboratory

- Tableau récapitulatif d'analyse :

Nom de l'outil		City Energy Analyst
Développé par		EPFL, Singapore ETH Centre, ETH Zürich, Future Cities Laboratory
Début du développement		2011
Date de mise à jour		2019
Mode de modélisation	Bâtiments	Modèles R6C1, systèmes HVAC décentralisés
	Réseaux thermiques	Chaud, tempérée, froid, stockage thermique
	Systèmes électriques	PV, cogénération ; Stockage électrique et micro-grid (en cours de développement)
	Masques solaires	Projection de chaque bâtiment via Radiance
	Occupation (Apports métaboliques et élec spécifique)	Modèle stochastique selon enquête emplois du temps, Ou scénarios horaires W/m ² standards (ASHRAE) ou à saisir
Interface		Interface avec ARCGIS possible
Type d'utilisation visée		AMO DD Aménagement, Recherche
Interaction avec d'autres outils		ARCGIS, Radiance
Mode de traitement des données d'entrée		Lecture de fichiers SIG
Cas d'étude		ETH University Campus - Zurich (2017) Tanjong Pagar – Singapore (2019) Nanyang Technical University – Singapore (2018)
Développements autres en cours		Non connu

- Description de l'outil :

City Energy Analyst est un outil open source développé au travers d'une collaboration suisse et singapourienne à des fins de recherche, de formation mais aussi pour des études de territoires réels (AMO DD aménagement). En plus de modéliser les bâtiments avec leurs enveloppes et leurs systèmes propres, City Energy Analyst embarque une modélisation des systèmes mutualisés de production et distribution énergétique : réseaux de chaleur, de froid ou tempérée, avec éventuellement du stockage thermique. Des développements sont en cours sur des modèles de micro-grid électriques. Il permet de modéliser simplement l'occupation et les usages selon la norme ASHRAE 90.1 sur la base de profils archétypes ou à l'aide de modèles stochastiques. L'outil dispose d'une interface avec l'utilisation de la plateforme payante ArcGIS. Il est également couplé avec Radiance le moteur de calcul d'éclairage naturel pour le calcul des masques solaires. L'outil possède également un module permettant de réaliser l'ACV d'un projet d'aménagement sur les contributeurs suivant : produits de construction

des bâtiments, consommation d'énergie en exploitation et déplacements quotidiens. Les résultats obtenus sont comparés à des consommations de référence donnés par le « 2000-Watt-Society benchmark »¹⁵.

- **Bibliographie**

Les informations décrites précédemment sous tirées des sources suivantes :

- Jimeno A.Fonseca, Thuy-An Nguyen, Arno Schlueter, Francois Marechal (2016). City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts, Energy and Buildings
- La documentation technique de l'outil en libre accès sur le site de City Energy Analyst (<https://cityenergyanalyst.com/>)

Par ailleurs l'outil fait l'objet de travaux de validation scientifique de ses résultats dans la publication suivante :

- J. Fonseca et A. Schlueter (2015). Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts

4.2.2 CitySim Pro - EPFL

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		CitySim Pro
Développé par		EPFL
Début du développement		Avant 2009
Date de mise à jour		2019
Mode de modélisation	Bâtiments	Modèles RC (multiples possibilités), multi-zone, systèmes HVAC décentralisés
	Réseaux thermiques	Non
	Systèmes électriques	PV, cogénération, éolienne
	Masques solaires	Oui
	Occupation (Apports métaboliques et élec spécifique)	Scénarios horaires W/m ² standards ou à saisir
Interface		Logiciel CitySim Pro distribuée par Kaemco
Type d'utilisation visée		AMO DD Aménagement, Recherche
Interaction avec d'autres outils		Sketchup, Rhino, CitySim (Cœur de Calcul)

¹⁵ Voir par exemple l'explication du principe de ce benchmark et son application sur la ville de Minneapolis (Minnesota) : *Fighting climate change as a 2000-Watt Society (Minneapolis Minnesota, carbon framework Plan, 2018)* http://intep.com/wp-content/uploads/2018/10/1-2000-Watt-Society-Framework_LoRes.pdf

Mode de traitement des données d'entrée	Lecture de fichiers SIG, Sketchup, CityGML ou AutoCAD
Cas d'étude	La Chaux-de-Fonds (Thèse de Diane PEREZ, 2014) via la plateforme MEU Lyon Confluence (Conference IBPSA France Bordeaux – 2018) : Pour test d'un chaînage avec l'outil CFD CIM
Développements autres en cours	Non connu

- **Description de l'outil :**

CitySimPro est l'outil le plus mature opérationnellement identifié dans la sélection de ce document. En effet, il est développé déjà depuis plus de dix ans et est actuellement distribué par l'éditeur de logiciel kaemco. CitySim Pro vise à réaliser des études d'AMO DD des projets d'aménagement en étant avant tout axé sur la simulation de l'enveloppe des bâtiments et des flux solaires à l'échelle quartier. CitySim Pro reste un peu limité en termes de modélisation des systèmes : Pas de possibilité de modéliser des réseaux thermiques, pas de modèles stochastiques d'occupation, pas de modèle d'éclairage intérieur. Néanmoins pour pallier ce manque des travaux de couplage avec des logiciels externes existent ayant pour but de modéliser certains phénomènes de manière plus spécifiques. Exemple : Chainage de CitySim Pro avec l'outil CFD CIM Lyon Confluence (Conference IBPSA France Bordeaux – 2018).

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sous tirées des sources suivantes :

- D. Perez; J. Kämpf; U. Wilke; M. Papadopoulo; D. Robinson (2011). Citysim simulation the case study of Alt Wiedikon, a neighbourhood of Zürich City
- Thèse de Jérôme Henri KÄMPF (2009)
- These de Diane PERZEZ (2014)
- La description de l'outil sur le site du développeur <http://www.kaemco.ch/download.php>

Par ailleurs l'outil fait l'objet de travaux de validation scientifique de ses résultats dans la publication suivante :

- E. Walter and J. Kämpf (2015). A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values



4.2.3 Pleiades+Comfie - IZUBA, CES Mines ParisTech

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		Pleiades+Comfie
Développé par		Izuba, CES Mines ParisTech
Début du développement		1994
Date de mise à jour		2019
Mode de modélisation	Bâtiments	Détaillé, multizone, systèmes HVAC décentralisés, modèle d'éclairage intérieur (Radiance)
	Réseaux thermiques	Chaud (prise en compte des pertes thermiques) et froid
	Systèmes électriques	PV, cogénération
	Masques solaires	Projection de chaque bâtiment via Radiance
	Occupation (Apports métaboliques et élec spécifique)	Stochastique selon enquête INSEE emplois du temps (résidentiel) avec le module AMAPOLA, Scénarios horaires W/m ² à saisir sinon ; Stochastique pour les bâtiments bureaux (en cours de développement)
Interface		Logiciel distribué par IZUBA
Type d'utilisation visée		AMO DD Bâtiments et calculs règlementaires
Interaction avec d'autres outils		Radiance, NovaEQUER (intégré à la suite logiciel)
Mode de traitement des données d'entrée		Saisie graphique dans l'interface
Cas d'étude		ZAC Clichy Batignolles (SEMAVIP, 2012) ZAC des PIELLES (Hérault Aménagement, 2010)
Développements autres en cours		Thèses menées régulièrement au CES contribuant à l'amélioration du logiciel

- **Description de l'outil :**

Cet outil est un outil de simulation énergétique dynamique du bâtiment développé depuis le début des années 90 et distribué par Izuba. Son cœur de cible est l'AMO DD à l'échelle du bâtiment mais il offre la possibilité de modéliser plusieurs bâtiments d'un même quartier afin d'évaluer les consommations énergétiques d'un projet d'aménagement dans son ensemble. Il demande cependant un paramétrage détaillé et spécifique à chaque bâtiment ce qui le rend peu opérationnel sur des phases amont des projets d'aménagement. Sur des phases plus avancées des projets, par exemple lorsqu'un plan guide ainsi que des esquisses de bâtiments sont disponibles, cet outil peut plus facilement être utilisé. Pleiades+Comfie est couplé à NovaEquer pour réaliser l'ACV des projets au sein de la même suite logicielle.

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sous tirées de la source suivante :

- La documentation technique de l'outil en libre accès sur le site d'Izuba (<http://docs.izuba.fr/>)

Par ailleurs l'outil fait l'objet de travaux de validation scientifique de ses résultats à l'échelle des projets d'aménagement dans la publication suivante :

- C. Ribault et al (2017). Assessing tools relevance for energy simulation at the urban scale: towards decision-support tools for urban design and densification

4.2.4 PowerDis (Dimosim) - Efficacy, CSTB

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		PowerDis (Dimosim)
Développé par		Efficacy, CSTB
Début du développement		2014
Date de mise à jour		2019
Mode de modélisation	Bâtiments	RC détaillé, multizone, systèmes HVAC décentralisés
	Réseaux thermiques	Modélisation détaillée : Chaud, tempérée, stockage thermique, Froid
	Systèmes électriques	PV, stockage électrique et cogénération
	Masques solaires	Projection pour chaque bâtiment à partir des hauteurs et empreintes au sol des barycentre des bâtiments du quartier.
	Occupation (Apports métaboliques et élec spécifique)	Scénarios horaires W/m ² standards ou à saisir ; Stochastique (en cours de développement) selon enquête INSEE emplois du temps pour le résidentiel et pour certains bâtiments tertiaires
Interface		Interface web service en cours de développement
Type d'utilisation visée		AMO DD Aménagement, Recherche
Interaction avec d'autres outils		Dimosim (cœur de calcul) Urban Print (couplage envisagée)
Mode de traitement des données d'entrée		Lecture de fichiers SIG ; Traitement automatique de données de données INSEE recensement (en cours de développement)
Cas d'étude		Saclay (EPA Paris Saclay, 2019) Toulouse Matabiau (Europolia, 2018) ZAC portes du Vercors (Thèse Nicolas Pérez 2018)
Développements autres en cours		Développement de nouveaux modèles de systèmes en cours

- **Description de l'outil :**

PowerDis est l'outil analysé le plus récent de ce document avec un début des développements du cœur de calcul démarré en 2014. Une interface web est en cours de développement qui a notamment pour objectif de permettre la réalisation d'études AMO DD de projets d'aménagement. PowerDis s'appuie sur un ensemble de modèles physiques (bâtiment, production, réseaux, etc.) structurés dans le cœur de calcul Dimosim développé par le CSTB avec l'appui d'Efficacy permettant une modélisation détaillée des enveloppes des bâtiments. PowerDis permet entre autres de modéliser les systèmes mutualisés de production et distribution énergétique : Réseaux de chaleur, de froid ou tempérée, avec éventuellement du stockage thermique. Des développements sont en cours pour enrichir la bibliothèque de modèles de systèmes ainsi que sur la modélisation stochastique de l'occupation (aujourd'hui présente pour le résidentiel mais pas dans le tertiaire). Des développements sont



également en cours pour chaîner Urban Print à PowerDis ayant pour but de fournir en entrée d'Urban Print les quantitatifs nécessaires à l'ACV des projets : consommation d'énergie en exploitation, produits de construction, réseaux énergétiques...

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sont tirées des sources suivantes :

- Thèse Nicolas Pérez, 2018
- Sources internes Efficacity

4.2.5 Smart-E - CES Mines ParisTech

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		Smart-E
Développé par		CES Mines ParisTech
Début du développement		2013
Date de mise à jour		2019
Mode de modélisation	Bâtiments	R6C2, multizone, systèmes décentralisés, modèle d'éclairage intérieur
	Réseaux thermiques	Non
	Systèmes électriques	PV
	Masques solaires	Valeurs constantes (résidentiel) et projection pour les bâtiments tertiaires
	Occupation (Apports métaboliques et élec spécifique)	Stochastique selon enquête INSEE emplois du temps (Résidentiel), Scénarios horaires W/m ² standards ou à saisir (pour bâtiments autres)
Interface		Non
Type d'utilisation visée		Recherche
Interaction avec d'autres outils		QGIS (couplage envisagé)
Mode de traitement des données d'entrée		Lecture de fichiers SIG, traitement automatique de données de données INSEE recensement
Cas d'étude		Clichy-Batignolles (Projet Cordees, Thèse en cours) Saint Denis Paris 18ème
Développements autres en cours		Développements autres en cours pour la modélisation des bâtiments de commerces et enseignement.

- **Description de l'outil :**

Smart-E est une bibliothèque de scripts informatiques sans interface utilisateur développée à des fins de recherche fonctionnant sur des territoires réels. Un couplage avec le logiciel de SIG QGIS est envisagé comme interface utilisateur. Smart-E embarque une modélisation RC simplifiée de l'enveloppe et des systèmes des

bâtiments, de leurs éclairagements intérieurs, ainsi qu'une modélisation stochastique de l'occupation dans les bâtiments résidentiels sur la base de données publiques territoriales (INSEE). Des développements sont en cours pour modéliser l'occupation des bâtiments à usage de bureaux. Smart-E ne permet cependant pas de modéliser les systèmes de distribution ou de production énergétiques mutualisés (les réseaux).

L'outil permet l'exploitation automatisée des bases de données territoriales publiques pour la simulation énergétique dynamique des bâtiments résidentiels d'un IRIS de l'INSEE.

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sous tirées des sources suivantes :

- Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, Pascal Stabat, Damien Casetta, Dominique Marchio (2015). Smart-E: A tool for energy demand simulation and optimization at the city scale

Par ailleurs le modèle R6C2 utilisé dans l'outil a fait l'objet de travaux de validation scientifique de ses résultats dans la publication suivante :

- Thomas Berthou, Pascal Stabat, Salvazet Raphael, Dominique Marchio (2014). Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings.

4.2.6 UMI - MIT, CCES National Science Foundation EFRI_SEED

- **Tableau récapitulatif d'analyse :**

Nom de l'outil		UMI
Développé par		MIT, CCES National Science Foundation EFRI_SEED
Début du développement		2012
Date de mise à jour		2018
Mode de modélisation	Bâtiments	RC, multizone, coefficient de performance des systèmes, modèle d'éclairage intérieur
	Réseaux thermiques	Non
	Systèmes électriques	PV
	Masques solaires	Projection de chaque bâtiment via Radiance
	Occupation (Apports métaboliques et élec spécifique)	Scénarios horaires W/m ² standards (ASHRAE 189.1 selon type d'occupation ou densité d'occupation à saisir)
Interface		Plug-in Rhinoceros 3D
Type d'utilisation visée		AMO DD Aménagement, Recherche
Interaction avec d'autres outils		EnergyPlus, Rhinoceros 3D, Grasshopper, Radiance
Mode de traitement des données d'entrée		Saisie graphique dans l'interface
Cas d'étude		Boston (2017) Lisbonne (2017) Kuwait (2016)
Développements autres en cours		-

- **Description de l'outil :**

UMI évalue les consommations énergétiques d'un projet urbain à l'aide du moteur de calcul Energy Plus. Il est intégré au logiciel de modélisation Rhinoceros 3D et vise à réaliser des missions d'AMO DD sur des projets d'aménagement comme des missions d'aide à la conception de la forme urbaine. UMI embarque une modélisation RC simplifiée de l'enveloppe des bâtiments, de leurs éclairagements intérieurs via le moteur de calcul Radiance et une modélisation très simplifiée des systèmes des bâtiments à l'aide de définition de coefficients de performance. UMI ne permet cependant pas de modéliser les systèmes de distribution ou de production énergétiques mutualisés (réseaux). Il permet de modéliser l'occupation et les usages selon la norme ASHRAE 189.1. Il intègre l'évaluation du contributeur produit de construction des bâtiments à partir des quantitatifs de matériaux calculés par le logiciel avec la modélisation 3D du quartier. UMI effectue également une estimation des déplacements quotidiens non motorisés en prenant notamment en compte la présence d'équipements à proximité (commerces, banques, restaurants, écoles, etc...), la température ambiante et les précipitations annuelles de la zone.

- **Bibliographie :**

Les informations décrites précédemment sous tirées des sources suivantes :

- La documentation technique de l'outil en libre accès sur le site de UMI <https://umidocs.readthedocs.io/en/latest/>
- L'état de l'art de la thèse Marc Lotteau (2017)
 - Christoph F Reinhart, Timur Dogan, J Alstan Jakubiec, Tarek Rakha and Andrew Sang (2013). UMI - AN URBAN SIMULATION ENVIRONMENT FOR BUILDING ENERGY USE, DAYLIGHTING AND WALKABILITY

Par ailleurs l'outil fait l'objet de travaux de validation scientifique de ses résultats dans la publication suivante :

- J. Sokol, D. Cerezo, C. Reinhart (2016). Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models



4.3 Travaux intégrant la prise en compte d'une évolution comportementale pour l'évaluation d'impact environnementaux

La méthodologie E+C- Quartier cherchera à calculer les émissions de GES et les consommations énergétiques d'un usager d'un projet d'aménagement sur l'ensemble de ses usages. Pour se faire, la méthode tâchera de prendre en compte les aspects comportementaux et de quantifier l'impact des leviers d'actions mis en place dans les projets pouvant agir directement ou indirectement sur nos usages. L'idée est ensuite de pouvoir comparer le bilan de l'usager du projet à des objectifs plus globaux (nationaux ou internationaux) de limitation du réchauffement climatique.

4.3.1 Prospective climatique et évolution des comportements

A l'échelle internationale, le GIEC est le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Il a pour mission d'évaluer les risques liés au réchauffement climatique. Sur la base de publications scientifiques, le GIEC prévoit la hausse des températures du globe en fonction de la quantité de gaz à effet de serre mondialement émis. Ainsi, le GIEC construit des trajectoires probables de la hausse des températures du globe suivant différents scénarios qui donnent le cap à tenir pour limiter le réchauffement climatique. Les états se saisissent de ces enjeux en se réunissant annuellement lors des conférences des parties (COP) où ils prennent des engagements sur des quotas carbone à ne pas dépasser pour respecter ces trajectoires établies par le GIEC (lors de la COP21, objectif de limiter le réchauffement mondial entre 1,5 et 2°C d'ici 2100). Ensuite au sein des états ou groupement d'états (Union Européenne par exemple), des politiques énergétiques et environnementales à moyen terme plus opérationnelles sont adoptées pour essayer d'aller dans le sens de ces objectifs globaux. Par exemple en France, la dernière Programmation Pluriannuelle de l'Energie dresse des trajectoires à respecter en matière énergétique jusqu'à 2028.

En parallèle de ces objectifs cadres décidés au niveau politique, de nombreuses initiatives publiques ou privées foisonnent pour construire des scénarios prospectifs d'évolution énergétiques ou climatiques à moyen ou long terme (2050/2100) : Trajectoires d'évolution du mix électrique à horizon 2020-2060 (scénario Ademe), bilan prévisionnel RTE (analyse long-terme 2035), Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 (Ademe, Grdf, GRTgaz), Paris Change d'ère (Ville de Paris), ... Les travaux prospectifs ont pour objectifs de répondre à une question précise comme par exemple : « Comment atteindre telle situation en telle année ».

Pour construire l'ensemble de ces travaux de prévisions ou prospectifs, leurs auteurs déterminent un ensemble d'hypothèses qui prennent en compte une évolution globale des comportements : Utilisation du véhicule électrique, sobriété énergétique, évolution de l'alimentation, etc... Les rapports de ces exercices prospectifs constituent ainsi des mines d'or d'hypothèses à exploiter pour appréhender le poids environnemental global que représente le changement de tel ou tel comportement de manière généralisée.

4.3.2 Prévision comportementale à l'échelle des projets d'aménagement

Un des enjeux que cherche à adresser le projet de recherche E+C- Quartier est d'améliorer la compréhension de l'influence que peut avoir un projet d'aménagement sur les comportements de ses usagers. La méthode cherchera à prendre en compte ces aspects comportementaux dans la quantification des impacts énergie carbone du projet.

Pour appréhender ces enjeux comportementaux, un point de départ est tout d'abord d'analyser les caractéristiques socio-démographiques des usagers d'un projet qui peuvent conditionner certaines de leurs manières d'agir. On peut citer le projet de recherche ANR IMPETUS qui développe dans sa méthodologie

d'évaluation des impacts énergie carbone des projets d'aménagement une analyse sociodémographique. Ce projet de recherche construit ainsi une méthodologie « *permettant de concevoir et de mettre en œuvre des projets d'aménagement urbain cohérents avec les stratégies de développement durable pour penser des villes autour des thèmes du logement, de l'économie et des transports [Korsu et al., 2012]* »¹⁶. Le projet a développé une méthodologie de retraitement de données socio-démographiques (données INSEE) permettant d'analyser le profil des futurs occupants du site en fonction des caractéristiques du projet urbain envisagé¹⁷. Cette méthode de retraitement de données se base sur l'hypothèse que les futurs arrivants d'un projets d'aménagement auront des caractéristiques socio-démographiques similaires aux précédents arrivants dans le territoire (sur l'IRIS ou sur la commune). Une fois les caractéristiques sociodémographiques des futurs occupants déterminés, la méthodologie IMPETUS prédit certains comportements sur les déplacements quotidiens des futurs usagers du site (en exploitant entre autres la base de données MobPro de l'INSEE sur les déplacements domicile travail).

Après cette première étape de détermination du profil des usagers d'un projet, il est ensuite possible d'essayer d'évaluer l'impact que peuvent avoir des leviers d'incitation aux changements des comportements sur le bilan énergie carbone d'un projet d'aménagement. Ces leviers peuvent prendre diverses formes : Information et éducation, programmation de commerces « responsables », communication engageante, marketing individualisé, accompagnement au changement, nudges, etc... Ces leviers influencent les usagers et ont donc un impact sur leur bilan énergie carbone. De plus, dans l'optique de comparer le bilan du projet à des trajectoires prospectives globales prenant elles en compte des hypothèses d'évolution des comportements, il apparaît nécessaire de quantifier à priori les effets de ces actions d'incitation. Cependant, il est évident qu'il est difficile de corrélérer directement l'impact d'une de ces actions isolée au bilan énergie carbone des usagers du projet. Le rapport de l'Ademe Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité analyse à travers le prisme des sciences humaines et sociales la complexité des effets de ces dispositifs : « *La mise en exergue des cadrages et des conditionnements de l'action individuelle révèle la complexité d'un comportement.* » conclue le rapport. Ainsi, bien que le changement global des comportements soit la clé dans la réussite de la transition écologique des territoires, force est de constater qu'il n'existe pas actuellement de méthodes simples pour quantifier directement l'effet d'une action d'incitation au changement comportemental d'un projet d'aménagement. De ce fait, les méthodes de quantification de l'impact d'actions d'incitation au changement relèveront pour le moment de coefficients de pondération déterminés de façon conventionnelle.

Par ailleurs, des associations et des entreprises ont fait de l'accompagnement au changement des comportements des usagers d'un territoire leur cœur d'activité. Ces dernières peuvent donc avoir des retours d'expérience chiffrés sur certains dispositifs. Par exemple, le projet de recherche Européen Cordees devrait publier à ce sujet des résultats en 2019. En effet, le projet Cordees a pour but de constituer une plateforme de gestion des systèmes énergétiques du quartier Clichy Batignolles permettant en temps réel le suivi de la production et consommation énergétique. Dans le cadre de ce projet de recherche, il va être analysé en 2019 les effets d'actions de sensibilisation menée par des entreprises sur les consommations énergétiques des usagers du quartier.

¹⁶ Olivier Bonin, Jean Laterasse (2018). Comment évaluer un projet urbain en intégrant ses impacts sur la mobilité? Les apports du projet ANR IMPETUS

¹⁷ Bonin et Gessalin, 2014



5 SYNTHÈSES OUTILS ET MÉTHODES

5.1 Synthèse de l'analyse des méthodes existantes

Il existe de nombreux référentiels techniques de labels ou certifications constituant des méthodes d'évaluation de la qualité environnementale d'un projet d'aménagement. Ces labels et certifications certifient qu'un projet atteint une certaine qualité environnementale en exigeant au travers de leurs référentiels techniques la bonne mise en place de leviers d'action, de cibles de performance pertinentes sur certains aspects de l'opération, d'un management adapté ou de services. L'analyse de ces référentiels technique a donc son importance pour la construction de la méthode E+C- Quartier. En effet, ils décrivent un très grand nombres de leviers d'action aux mains des aménageurs et témoignent des méthodes d'évaluation pratiquées aujourd'hui dans les projets. Les principales méthodes d'évaluation environnementales de projet d'aménagement identifiées dans ce document sont les référentiels techniques des labels ou certifications suivantes :

- Les labels Ecoquartier et RFSC
- Les certifications HQE Aménagement, BREEAM Communities, LEED for Neighborhood Development, et CASBEE for Urban Development

Lorsque les porteurs de projets mettent en œuvre ces méthodes d'évaluation, ils peuvent être amenés à estimer la consommation énergétique ou les émissions de GES de certaines actions spécifiques (exemple : évaluer la consommation la part d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique en exploitation du projet pour le référentiel RFSC). Cependant cette évaluation quantifiée n'y est pas faite de manière exhaustive pour l'ensemble des contributeurs d'un projet d'aménagement comme l'imposerait une Analyse de Cycle de Vie (ACV) sur un projet. Aujourd'hui on ne recense pas de méthode ACV qui se serait imposée dans les projets d'aménagement au travers d'une approche standardisée que constituerait un label, une certification, une norme, une méthode déposée (®) ou un référentiel technique reconnu.

Les normes ISO 14 040 et ISO 14 044 (ISO, 2006a, b) qui exposent les principes et lignes directrices de l'ACV définissent quatre phases pour une méthode en Analyse de Cycle de Vie :

- La phase de définition des objectifs et du champs de l'étude
- La phase d'inventaire de cycle de vie
- La phase d'évaluation
- La phase d'interprétation

En vue du travail de construction de la méthode E+C- Quartier, le présent document recense et analyse les objets existants en matière d'évaluation énergie carbone à l'échelle des projets d'aménagement au travers du prisme de ces quatre phases de l'ACV.

- Différents travaux de la littérature proposent de définir des périmètres d'évaluation adaptés aux échelles urbaines. Ces travaux peuvent donc alimenter les choix sur la définition **du champs de l'étude** de la méthode E+C- Quartier. Trois travaux majeurs sont identifiés :
 - Le périmètre de responsabilité totale (Loiseau, 2014)
 - Le protocole relatif aux gaz à effet de serre des communautés (Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC)) (WRI, 2014)
 - La norme britannique PAS 2070 (BSI, 2013)
- **La phase de production de l'inventaire du cycle de vie** consiste à faire l'inventaire des flux entrant et sortant du système étudié (flux énergétique, matières, transport, etc...) qui peut donc être plus large que le périmètre géographique du quartier. Cette phase est souvent assistée par l'utilisation



de logiciels dédiés. Les logiciels ACV adaptés à l'échelle des projets d'aménagement sont recensés dans le paragraphe 4 de ce document et synthétisés dans le paragraphe 5.2

- **La phase d'évaluation** des impacts du cycle de vie permet ensuite de traduire les données d'inventaire ou « les quantitatifs » en impacts sur l'environnement. Pour se faire les méthodes d'ACV s'appuient sur des bases de données environnementales. Le livrable 2.3 identifie **les bases de données multisectorielles** Base carbone, Ecoinvent et GaBi, ainsi que **les bases de données spécialisées** INIES et IMPACTS comme pouvant être utiles au développement de la méthodologie E+C- Quartier. En effet les données environnementales d'INIES sont très exhaustives à l'échelle du bâtiment concernant les impacts relatifs aux produits de construction. Sur les autres contributeurs, afin de couvrir l'ensemble des leviers d'action que cherchera à instruire la méthode E+C- Quartier, les 5 bases de données pourront être utilisées. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres sources de données environnementales peuvent également être mobilisées. A titre illustratif, on peut citer le travail du groupement C40 retranscrit dans le rapport [Consumption-Based GHG Emissions of C40 cities](#). En effet, ce rapport en plus d'illustrer l'application de l'évaluation des émissions de GES de 79 villes sur la base du standard GPC (cité précédemment), illustre également l'approche en ACV « économique ». Cette dernière consiste à utiliser des contenus en kgeqCO2/€ reconstruits après analyse des comptabilités économiques nationales et carbonees par secteur (via des modèles notamment réalisés par le Global Trade Analysis Project)
- **La phase d'interprétation** des résultats est essentielle pour pouvoir appréhender les résultats de l'évaluation ACV. Dans ce sens la méthode E+C- Quartier initie une démarche innovante pour la création d'une nouvelle unité fonctionnelle à savoir : l'usager des services du quartier (le type d'usager et les services associés pouvant être choisis selon l'objectif de l'étude). L'approche par usager pourrait ainsi permettre d'interpréter les résultats obtenus sur un projet en lien avec des objectifs de transition écologique plus globaux (trajectoires carbonees mondiales, nationales, régionales, etc...). Ce travail s'inscrit dans la continuité d'une première étude intitulée « BBCA Quartier : Vers le quartier bas carbone » et réalisée par le CSTB et Elioth pour le compte de l'association Bâtiment Bas Carbone.

Ainsi si à l'échelle des projets d'aménagement, aucune méthode de quantification des impacts énergie carbone quartier ne s'est encore imposée dans les projets à travers une approche standardisée (label, une certification, une norme ou une méthode déposée® ou référentiel technique reconnu), il en est autrement à des échelles spatiales plus fines ou plus larges :

- **A l'échelle de la planification territoriale**, la méthode du Bilan Carbone® est utilisée pour évaluer les Plans Climat Air Energie Territorial (PCAET)
- **A l'échelle du bâtiments ou de la parcelle**, la méthode E+C- Bâtiment (repris également dans les labels Effinergie, BBCA et par la certification HQE) pour évaluer la conception des projets de construction neuves.

Les méthodes d'évaluation [Bilan Carbone®](#) (exigée par la LTECV dans les PCAET) et [E+C- bâtiments](#) peut être analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV. Cette analyse est synthétisée dans le tableau suivant :

	Bilan Carbone® (PCAET)	E+C- Bâtiment
Champs de l'étude (Périmètre)	<p>Evaluation des émissions de GES sur les Scopes 1 et 2.</p> <p>Le scope 3 est demandé à titre facultatif</p>	<p>Evaluation sur 50 ans des émissions de GES et de la consommation d'énergie primaire sur le contributeur <u>Consommation d'énergie en exploitation</u></p> <p>Evaluation sur 50 ans des émissions de GES uniquement sur les contributeurs : <u>Produits de construction et équipements, Chantier, Eau</u></p>
Inventaire de cycle de vie (Outils utilisé)	Bilan Carbone®, Observatoire régional	OneClick LCA, Elodie, NovaEQUER, ThermACV, le module E+C- de Climawin.
Phase d'évaluation (Bases de données environnementales)	Base Carbone	Base INIES
Interprétation	<p>Se comparer à des objectifs de la LCTEV</p> <p>Exemple¹⁸ : Objectif 2020 : -20 % (en cohérence avec les objectifs fixés aux niveaux européen et national),</p>	<p>Niveau E</p> <p>Niveau C</p>

Figure 14 : Les méthodes d'évaluation Bilan Carbone® (exigée par la LCTEV dans les PCAET) et E+C- bâtiments analysée au travers du prisme des 4 phases de l'ACV.

¹⁸ Voir page 19 le rapport de l'ABC (Association Bilan Carbone) Bonnes pratiques des territoires en faveur du climat – Enquête 2017

5.2 Synthèse de l'analyse des outils d'évaluation

5.2.1 Synthèse des outils d'évaluation ACV multi contributeurs adaptés à l'échelle des projets d'aménagement

		GES Opam	Nest	Urban Print	NovaEQUER
Energies et réseaux	Consommation d'énergie en exploitation	Carbone (Ratio /m ² spécifiques)	Oui (Ratio /m ² spécifiques)	Oui (Ratio /m ² et SED à terme)	Oui (Pleiades+ Comfie)
	Réseaux énergétiques	Carbone	Oui (linéaire de RCU)	Non (Oui à terme)	Oui
Bâtiments	Produits de construction	Carbone	Oui (Modélisation 3D ou SIG)	Oui (Modélisation volumétrique à terme)	Oui (Modélisation 3D)
	Chantier de construction	Non	Oui	Non (Oui à terme)	Oui (Ratio /m ² SDP)
	Chantier de déconstruction	Carbone	Oui	Non (Oui à terme)	Non
Services urbains	Gestion de l'eau	Non	Oui (Ratio /occ)	Oui (Ratio /occ)	Oui (Ratio /occ et équipements)
	Réseaux d'eau	Carbone	Oui (Ratio /occ)	Oui (Ratio /occ)	Oui
	Gestion des déchets	Non	Oui (Ratio /occ)	Oui (Ratio /occ)	Oui (Ratio /occ)
Aménagement des espaces extérieurs	Construction	Carbone	Oui	Oui	Oui
	Puit carbone	Oui (Ratio /m ²)	Non	Non (Oui à terme)	Non
Mobilité des personnes et logistique	Déplacements quotidiens	Carbone (Ratio EMD)	Oui (Ratio EMD)	Oui (Ratio EMD)	Oui (Ratio EMD)
	Déplacements exceptionnels	Non	Non	Non	Non
	Transport de marchandise	Non	Non	Non	Non
Consommation	Alimentation	Non	Non	Non	Non
	Consommation de biens	Non	Non	Non	Non

Figure 15 : Tableau de synthèse de l'analyse des outils d'évaluation d'impact environnementaux multi contributeurs à l'échelle des projets d'aménagement

Concernant les outils d'évaluation environnementaux multi-contributeurs ACV adaptés à l'échelle des projets d'aménagement, 4 outils ont été identifiés et leurs analyses synthétisées dans le tableau ci-dessus. Les indications entre parenthèse rappellent les moyens proposés par les outils pour calculer les **quantitatifs** nécessaires à l'évaluation des impacts énergie carbone d'un projet.

On ne constate qu'aucun des outils n'évaluent de manière exhaustive l'ensemble des contributeurs définis dans le paragraphe 3.2 de ce document. Notamment aucun de ces outils n'inclut pour le moment la quantification des contributeurs sur lequel l'aménageur n'a à priori pas ou peu de leviers d'action direct mais sur lesquels la

méthodologie E+C- Quartier souhaite apporter des éléments de comptabilisation énergie carbone : Déplacements exceptionnels, transport de marchandises, alimentation et consommation de biens.

Plus spécifiquement sur chacun de ces outils, les constats suivant peuvent être faits :

- **GES Opam** : Il s'agit d'un outil d'évaluation uniquement des émissions de GES des projets d'aménagement. L'outil met en œuvre la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME sur ces types de projets. Il est l'unique outil identifié évaluant les contributeurs déconstruction et puit carbone. L'outil GES Opam va faire l'objet d'une mise à jour en 2019 vers le nouvel outil en cours de développement GES URBA. Ce dernier opérera à la fusion des outils actuels GES Scot, GES PLU et GES OpAm pour créer un unique outil adressant l'ensemble de ces échelles.
- **Nest** : Cet outil d'ACV Quartier développé par NOBATEK/INEF4 vient de faire l'objet en 2018 d'une refonte logiciel sous la plateforme de manipulation de données EEGLE. Suite à cette refonte, Nest est bien avancé en termes de manipulation de données entrée (prise en compte de fichiers SIG ou maquette 3D) qui lui permet de bien s'adapter aux différentes phases des projets d'aménagement. Nest intègre des ratios de calculs de consommation énergétique des bâtiments prenant en compte des caractéristiques de morphologie urbaine.
- **NovaEquer** : Cet outil ayant pour but originairement de réaliser des ACV bâtiments est l'outil identifié dans ce document qui évalue les contributeurs le plus exhaustivement possible. Cependant cet outil demande un paramétrage détaillé et spécifique à chaque bâtiment ce qui le rend peu opérationnel sur des phases amont des projets d'aménagement. Les consommations d'énergie en phase exploitation sont calculées à partir du logiciel STD Bâtiment Pleiades+Comfie (compris dans la même suite logicielle). Sur des phases plus avancées des projets, par exemple lorsqu'un plan guide ainsi que des esquisses de bâtiments sont disponibles, cet outil peut plus facilement être utilisé.
- **Urban Print** : Cet outil développé par Efficacity et le CSTB a fait l'objet en 2018 de la mise en ligne d'une première application web. Plusieurs développements sont en cours actuellement. Par exemple un travail de création de macro-composants à partir de la base INIES est en cours afin de mieux prendre en compte le contributeur bâtiment de manière adaptée à l'échelle des projets d'aménagement (constitution d'une base UrbanINIES). D'autres travaux sur la gestion de fichiers SIG en données d'entrée, sur le couplage d'Urban Print avec PowerDis (outil SED quartier) pour calculer les consommations d'énergie en exploitation et les quantitatifs produits de construction des bâtiments ou encore sur la mobilité dans les villes de taille moyenne sont en cours.

L'outil GES Opam (prochainement GES URBA) semble bien adapté à des échelles larges (échelle projet d'aménagement à communauté de communes). L'outil NovaEquer est quant à lui bien adapté à des échelles plus petites et plus avancée en conception (échelle bâtiment à projet d'aménagement). Les outils Nest et Urban Print ont pour rayon d'action spécifiquement l'échelle des projets d'aménagement. Ces deux outils connaissent actuellement des développements actifs qui témoignent de leurs potentiels d'adaptabilité à répondre à une future méthode E+C- Quartier. Le CES des Mines Paris Tech réalise aussi des travaux de recherche sur l'ACV quartier laissant présager la possibilité d'un développement d'un outil adapté ou l'adaptation opérationnelle de NovaEquer à l'échelle des projets d'aménagement.

5.2.2 Synthèse des outils de calcul dynamique des consommations d'énergie

		City Energy Analyst	CitySim	Pleiades+Comfie	PowerDis (Dimosim)	Smart-E	UMI
Origine		EPFL, Singapore ETH Centre	EPFL	IZUBA, CES Mines ParisTech	Efficacity, CSTB	CES Mines ParisTech	MIT
Type d'utilisation		AMO DD Aménagement, Recherche	AMO DD Aménagement, Recherche	AMO DD Bâtiments et calculs réglementaire	AMO DD Aménagement, Recherche	Recherche	AMO DD Aménagement, Recherche
Mode de traitement des données		Lecture fichiers SIG	Lecture fichiers SIG, Sketchup, CityGML ou AutoCAD	Saisie graphique interface	Lecture fichiers SIG	Lecture fichiers SIG	Saisie graphique interface
Interface		ArcGIS	Distribué par kaemco	Distribué par Izuba	En cours de dev.	Non	Plug-in Rhino
Modélisation	Bâtiments	R6C1, HVAC décentralisés	RC, multizone, HVAC décentralisés	Détaillé, multizone, HVAC décentralisés, Radiance	Détaillé, multizone, HVAC décentralisés	RC, multizone, HVAC décentralisés, éclairage intérieur	RC, multizone, coefficients performances systèmes, éclairage intérieur
	Réseaux thermiques	Chaud, tempérée, froid, stockage thermique	Non	Chaud et froid (perte thermique)	Chaud, tempérée, stockage thermique	Non	Non
	Systèmes électriques	PV, cogé, stockage	PV, cogé, éoliennes	PV, cogé	PV, stockage, cogé	PV	PV
	Masque Solaire	Projection (Radiance)	Oui	Projection (Radiance)	Projection barycentre bâtiment	Valeur constante ou projection	Projection (Radiance)
	Occupation	Stochastique, standard (ASHRAE) ou à saisir	Standard ou à saisir	Stochastique, ou à saisir	Stochastique (en cours de dev.), Standard ou à saisir ;	Stochastique, standard ou à saisir	Standard
Contributeurs évalués (Autre que consommation énergétiques)		Produits de construction, déplacements quotidiens	-	Couplage NovaEQUER	Couplage Urban Print (en cours de dev.)	-	Produits de construction, Déplacements quotidiens

Figure 16 : Tableau de synthèse de l'analyse des outils existants de simulation dynamique des consommations énergétiques à l'échelle des projets d'aménagement

Le tableau ci-dessus résume l'analyse menée dans ce document sur les six outils de simulation dynamique des consommations énergétiques des bâtiments à l'échelle des projets d'aménagement identifiés.

L'application d'une approche énergétique dynamique à l'échelle des projets d'aménagement permet d'étudier en amont des projets certains leviers d'actions aux mains des aménageurs : Dimensionnement fin des infrastructures énergétiques, réseaux locaux d'énergie, solutions de flexibilité, évolution comportementale. A l'exception de Pleiades+Comfie, les outils de simulation énergétiques dynamiques analysés ici sont récents (une dizaine d'années au maximum avec un début des développements entre 2008 et 2014). Cela explique pourquoi leurs champs d'action restent encore limités à celui de la recherche et pourquoi ils n'ont pas encore trouvé une application systématique opérationnelle dans les projets d'aménagement.

L'ensemble des outils sélectionnés dans ce document sont des outils de simulations thermiques dynamiques faisant appel à des modèles RC (analogie du modèle thermique en modèle électrique) plus ou moins détaillés pour caractériser les bâtiments. Les informations analysées sur ces outils sont issues le plus possible de publications de recherches ou documentations techniques des outils. Ils sont tous dits techno-explicites (présence de modèles décrivant le comportement d'équipements HVAC dans les bâtiments) à l'exception d'UMI qui prend en compte les systèmes avec des coefficients de performances paramétrables par l'utilisateur. Ces outils permettent de manipuler en fichiers d'entrée des fichiers SIG à l'exception d'UMI et de Pleiades+Comfie qui demandent de réelles modélisations 3D des bâtiments au travers d'une interface dédiée. Seuls City Energy Analyst et PowerDis permettent de modéliser pleinement des réseaux thermiques, Pleiades+Comfie le fait de manière très simplifiée en calculant des pertes thermiques forfaitaires sur les réseaux.

Plus spécifiquement sur chacun de ces outils, l'analyse met en avant les points singuliers suivant :

- **City Energy Analyst** : Cet outil open source est développé au travers d'une collaboration suisse et singapourienne à des fins de recherche, de formation mais aussi pour des études de territoires réels (AMO DD aménagement). En plus de modéliser les bâtiments avec leurs enveloppes et leurs systèmes propres, City Energy Analyst embarque une modélisation des systèmes mutualisés de production et distribution énergétique : réseaux de chaleur, de froid ou tempérée, avec éventuellement du stockage thermique. Des développements sont en cours sur des modèles de micro-grid électriques. Il permet de modéliser simplement l'occupation et les usages selon la norme ASHRAE 90.1 sur la base de profils archétypes ou à l'aide de modèles stochastiques. L'outil dispose d'une interface avec l'utilisation de la plateforme payante ArcGIS. Il est également couplé avec Radiance le moteur de calcul d'éclairage naturel pour le calcul des masques solaires. L'outil possède également un module permettant de réaliser l'ACV d'un projet d'aménagement sur les contributeurs suivant : produits de construction des bâtiments, consommation d'énergie en exploitation et déplacements quotidiens. Les résultats obtenus sont comparés à des consommations de référence donnés par le « 2000-Watt-Society benchmark ».
- **CitySim Pro** : Il s'agit de l'outil le plus mature opérationnellement identifié dans la sélection de ce document. En effet, il est développé déjà depuis plus de dix ans et est actuellement distribué par l'éditeur de logiciel kaemco. CitySim Pro vise à réaliser des études d'AMO DD des projets d'aménagement en étant avant tout axé sur la simulation de l'enveloppe des bâtiments et des flux solaires à l'échelle quartier. CitySim Pro reste un peu limité en termes de modélisation des systèmes : Pas de possibilité de modéliser des réseaux thermiques, pas de modèles stochastiques d'occupation, pas de modèle d'éclairage intérieur. Néanmoins pour pallier ce manque des travaux de couplage avec des logiciels externes existent ayant pour but de modéliser certains phénomènes de manière plus spécifiques. Exemple : Chainage de CitySim Pro avec l'outil CFD CIM Lyon Confluence (Conference IBPSA France Bordeaux – 2018).



- **Pleiades+Comfie** : Cet outil est un outil de simulation énergétique dynamique du bâtiment développé depuis le début des années 90 et distribué par Izuba. Son cœur de cible est l'AMO DD à l'échelle du bâtiment mais il offre la possibilité de modéliser plusieurs bâtiments d'un même quartier afin d'évaluer les consommations énergétiques d'un projet d'aménagement dans son ensemble. Il demande cependant un paramétrage détaillé et spécifique à chaque bâtiment ce qui le rend peu opérationnel sur des phases amont des projets d'aménagement. Sur des phases plus avancées des projets, par exemple lorsqu'un plan guide ainsi que des esquisses de bâtiments sont disponibles, cet outil peut plus facilement être utilisé. Pleiades+Comfie est couplé à NovaEquer pour réaliser l'ACV des projets au sein de la même suite logicielle.
- **PowerDis (Dimosim)** : Cet outil est le plus récent de ce document avec un début des développements du cœur de calcul démarré en 2014. Une interface web est en cours de développement qui a notamment pour objectif de permettre la réalisation d'études AMO DD de projets d'aménagement. PowerDis s'appuie sur un ensemble de modèles physiques (bâtiment, production, réseaux, etc.) structurés dans le cœur de calcul Dimosim développé par le CSTB avec l'appui d'Efficacity permettant une modélisation détaillée des enveloppes des bâtiments. PowerDis permet entre autres de modéliser les systèmes mutualisés de production et distribution énergétique : Réseaux de chaleur, de froid ou tempérée, avec éventuellement du stockage thermique. Des développements sont en cours pour enrichir la bibliothèque de modèles de systèmes ainsi que sur la modélisation stochastique de l'occupation (aujourd'hui présente pour le résidentiel mais pas dans le tertiaire). Des développements sont également en cours pour chainer Urban Print à PowerDis ayant pour but de fournir en entrée d'Urban Print les quantitatifs nécessaires à l'ACV des projets : consommation d'énergie en exploitation, produits de construction, réseaux énergétiques...
- **Smart-E** : Il s'agit d'une bibliothèque de scripts informatiques sans interface utilisateur développée à des fins de recherche fonctionnant sur des territoires réels. Un couplage avec le logiciel de SIG QGIS est envisagé comme interface utilisateur. Smart-E embarque une modélisation RC simplifiée de l'enveloppe et des systèmes des bâtiments, de leurs éclairagements intérieurs, ainsi qu'une modélisation stochastique de l'occupation dans les bâtiments résidentiels sur la base de données publiques territoriales (INSEE). Des développements sont en cours pour modéliser l'occupation des bâtiments à usage de bureaux. Smart-E ne permet cependant pas de modéliser les systèmes de distribution ou de production énergétiques mutualisés (les réseaux). L'outil permet l'exploitation automatisée des bases de données territoriales publiques pour la simulation énergétique dynamique des bâtiments résidentiels d'un IRIS de l'INSEE.
- **UMI** : Cet outil évalue les consommations énergétiques d'un projet urbain à l'aide du moteur de calcul Energy Plus. Il est intégré au logiciel de modélisation Rhinoceros 3D et vise à réaliser des missions d'AMO DD sur des projets d'aménagement comme des missions d'aide à la conception de la forme urbaine. UMI embarque une modélisation RC simplifiée de l'enveloppe des bâtiments, de leurs éclairagements intérieurs via le moteur de calcul Radiance et une modélisation très simplifiée des systèmes des bâtiments à l'aide de définition de coefficients de performance. UMI ne permet cependant pas de modéliser les systèmes de distribution ou de production énergétiques mutualisés (réseaux). Il permet de modéliser l'occupation et les usages selon la norme ASHRAE 189.1. Il intègre l'évaluation du contributeur produit de construction des bâtiments à partir des quantitatifs de matériaux calculés par le logiciel avec la modélisation 3D du quartier. UMI effectue également une estimation des déplacements quotidiens non motorisés en prenant notamment en compte la présence d'équipements à proximité (commerces, banques, restaurants, écoles, etc...), la température ambiante et les précipitations annuelles de la zone.



5.2.3 Synthèses des travaux intégrant la prise en compte d'une évolution comportementale pour l'évaluation d'impact environnementaux

Un des enjeux qui sera adressé au cours de ce projet de recherche E+C- Quartier est l'influence que peut avoir un projet d'aménagement sur les comportements de ses usagers. La méthode cherchera à prendre en compte ces aspects comportementaux dans la quantification des impacts énergie carbone du projet. Ce document ouvre plusieurs pistes de réflexion sur les pratiques déjà existantes dans les projets en vue d'alimenter les travaux de construction de la méthode :

- Des ordres de grandeurs d'impact énergie carbone liés à l'évolution de comportements à une échelle globale peuvent être appréhender dans divers exercices prévisionnels ou prospectifs que l'on retrouve dans la littérature (GIEC, PPE, scénarios Ademe, Paris Change d'ère, ...).
- A l'échelle des projets d'aménagement, un point de départ de la prise en compte des aspects comportementaux est d'analyser les indicateurs socio-démographiques des usagers du projet. La méthodologie développée dans le projet ANR IMPETUS est un exemple de mise en pratique de ce concept.
- Ce document pointe enfin l'absence de méthode simple pour quantifier l'impact d'une action locale d'incitation au changement des comportements. Le projet de recherche Cordees qui exploitera des remontées terrains de sensibilisation sur la ZAC Clichy Batignolles est un exemple de travaux à suivre sur ce sujet.

