

Indicateurs et simulations de développements immobiliers à l'aide d'outils SIG

Sven Fragnière

Juillet 2023

Domaine Ingénierie et Architecture

Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial Orientation Ingénierie géomatique

Directeur: Yves Deillon

 $\hbox{\it Co-directeur}: \hbox{\it Dr. Jens Ingensand}$

Expert : Guillaume Dekkil

Mémoire n°: 1068



Table des matières

Ta	ble d	les figur	es	iv
Li	ste d	es tablea	aux	v
Re	emer	ciement	ts ·	vi
Li	ste d	es abrév	riations	vii
1	Intr	oductio	n	1
	1.1	Buts et	objectifs	2
	1.2		nts attendus	3
	1.3		ıre du rapport	3
2	Méd	anisme	s généraux et démarches actuelles dans le développement immobilier	4
	2.1	Process	sus de développements immobiliers	4
			Contexte qualitatif	6
	2.2	Acteurs	s du développement immobilier	7
		2.2.1	Propriétaire foncier	7
		2.2.2	Autorité territoriale	8
		2.2.3	Développeur immobilier	8
		2.2.4	Maître d'ouvrage / investisseur	9
		2.2.5	Mandataires	9
		2.2.6	Population	9
	2.3	Outils	d'aide à la décision	10
		2.3.1	Aspects techniques	10
		2.3.2	Aspects financiers	11
		2.3.3	Aspects de durabilité et d'énergie	12
3	Mod	délisatio	on du développement immobilier avec une approche quantitative	15
	3.1	Contra	intes	16
		3.1.1	Légales	16
		3.1.2	Foncières	16
		3.1.3	Opérationnelles	17
	3.2	Intérêt	d'un outil de simulation	18
		3.2.1	Acteurs visés	19
		3.2.2	Indicateurs quantitatifs	20
		3.2.3	Utilisation d'une interface SIG	20
	3.3	Entités	de référence pour les simulations	23
		3.3.1	Lots	23
		3.3.2	Zones de développement	24
		3.3.3	Périmètre du plan d'affectation	24
	3.4	Modéli	sation des données	25
		3.4.1	Modèle des données de base	25
		3.4.2	Stockage des résultats et gestion de variantes	26

4	Dév	eloppe	ement d'une maquette SIG sur le projet des Prés-de-Vidy	28
	4.1	Le pro	ojet des Prés-de-Vidy	28
		4.1.1	Contexte	28
		4.1.2	Situation foncière	29
		4.1.3	Etat d'avancement	29
	4.2	Inven	taire des contraintes du site	30
		4.2.1	Fouilles archéologiques	31
		4.2.2	Pollution des sols	32
		4.2.3	Démolition de bâtiments	33
		4.2.4	OPAM et OPB	34
		4.2.5	Equipements publics	34
	4.3	Monta	age de la maquette	35
		4.3.1	Données à disposition et intégration dans la base de données	35
		4.3.2	Ajout des données manquantes et renseignement des tables attributaires	36
		4.3.3	Maquette SIG	36
	4.4	Indica	ateurs calculés	37
		4.4.1	Définitions	37
		4.4.2	Méthodes de calcul et choix techniques	40
	4.5	Progra	ammation des fonctionnalités	40
		4.5.1	Démarche technique	40
		4.5.2	Récupération des données de base	41
		4.5.3	Calcul des indicateurs	41
		4.5.4	Génération d'un rapport	42
		4.5.5	Comparaison de variantes	43
		4.5.6	Export de données pour SméO	44
		4.5.7	Plugin et interface utilisateur	45
	4.6	Scéna	urios de simulation	45
	4.7	Résul	tats et analyses	47
		4.7.1	Rendus	47
		4.7.2	Précision et fiabilité des résultats	49
		4.7.3	Améliorations possibles	51
_				
5		cussior		54
	5.1		posabilité du concept de l'outil	54
	5.2		rts et lacunes pour les acteurs	55
	5.3		rence globale des résultats	56
	5.4	Simpl	licité de mise en oeuvre	57
6	Pers	spectiv	res	58
	6.1	-	et gouvernance	58
	6.2		ace utilisateur	59
	6.3		ration de la 3D	59

	6.4 Pré-traitement des données de base	 60
7	Conclusion	61
Bi	oliographie	62
Aı	nexes	64
	A. Maquette	 64
	B. Résultats	 65
	B1. Rapports	 68
	B2. Comparaison de variantes	 70
	B3. Export SméO	 71
	C. Indicateurs : méthodes de calcul et choix techniques	 81
	D. Fichiers numériques	 81
	E. Marche à suivre pour l'installation	84

Table des figures

1.1	Contexte d'aide à la décision pour le développement immobilier	1
2.1	Système de planification suisse (BÜHLMANN, 2021)	5
2.2	Programme du PDQ n° 29'500 - 526 - les Vergers (ETAT DE GENÈVE - DIRECTION DE	
	L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, 2006)	5
2.3	Contexte qualitatif du développement immobilier	7
2.4	Acteurs du développement immobilier et leurs rôles	10
2.5	Simulateur SIMO (SPATIOMATICS, 2023)	11
2.6	Mise en évidence de terrains nus constructibles (Leroux et Cerema Ouest, 2018) $ \ldots $	12
2.7	Indicateurs techniques demandés par SméO en entrée (Roulet et Liman, 2021) $$	14
3.1	Exemples de différences entre les aspects qualitatifs et quantitatifs	15
3.2	Contexte d'application dans les grandes phases du développement immobilier $\ \ldots \ \ldots$	19
3.3	Acteur visés, échelles de simulation et intérêts associés	20
3.4	Architecture de l'outil et apports de l'interface SIG	22
3.5	Types de rendus pouvant être générés par l'outil	23
3.6	Structure des données de bases	25
3.7	Passage du format UML à une base de données	26
3.8	Modèle utilisé pour monter la base de données	27
3.9	Système de stockage des variantes	27
4.1	Situation générale des Prés-de-Vidy (VILLE DE LAUSANNE - BDM, 2018)	28
4.2	Représentation des contraintes impactant le site des Prés-de-Vidy	31
4.3	Situation des fouilles et vestiges (Section Archéologie Cantonale, 2018)	32
4.4	Filières d'évacuation des terres polluées selon l'OLED (ECOSCAN SA, 2019)	33
4.5	Maquette SIG du quartier	37
4.6	Processus technique global de fonctionnement de l'outil	41
4.7	Récupération des données de base	42
4.8	Calcul des indicateurs	42
4.9	Processus pour la génération d'un rapport par entité	43
4.10	Processus pour la comparaison de variantes	44
4.11	Processus d'export de données pour SméO	44
4.12	Interface utilisateur	45
4.13	Exemples de rapports générés automatiquement	47
4.14	Comparaison de variantes	48
4.15	Export d'un fichier XML pour SméO	48
4.16	Animation temporelle	49
4.17	Imprécision dans le calcul des déblais/remblais avec des bâtiments contigus	49
6.1	Processus automatisé d'intégration de données avec FME	60

Liste des tableaux

3.1	Contraintes légales, impacts et mesures	16
3.2	Contraintes foncières, impacts et mesures	17
3.3	Contraintes opérationnelles, impacts et mesures	18
3.4	Catégories d'indicateurs, acteurs visés et échelle de simulation	21
4.1	Données de bases, types, formats et tables de destination	35
4.2	Indicateurs de phasage, définitions et données nécessaires au calcul	37
4.3	Indicateurs techniques, définitions et données nécessaires au calcul	38
4.4	Indicateurs environ. et énergétiques, définitions et données nécessaires au calcul	38
4.5	Indicateurs financiers, définitions et données nécessaires au calcul	39
4.6	Indicateurs de mixité, définitions et données nécessaires au calcul	39
4.7	Précision estimée des indicateurs basée uniquement sur leur méthode de calcul $\ \ldots \ \ldots$	50
4.8	Attributs entrés, qualité de l'estimation et poids dans les calculs	51
4.9	Fiabilité estimée des indicateurs en fonction des attributs	52

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier les personnes suivantes :

- Messieurs Guillaume Dekkil et Grégory Dubois, respectivement responsable et chef de projet au Bureau de Développement et Projet Métamorphose (BDM) de la Ville de Lausanne, pour le temps consacré au suivi de ce travail ainsi que les conseils et documents transmis.
- Messieurs Yves Deillon et Jens Ingensand, professeurs à la HEIG-VD et respectivement directeur et co-directeur de ce travail, pour leur disponibilité, leurs conseils et le temps consacré tout au long de ce Master.
- Monsieur Léonard Verest, architecte-urbaniste à L'État de Genève et professeur HES, et Monsieur Vincent Clapasson, expert immobilier chez Wüest Partner, pour m'avoir fait part de leurs expériences et pour la documentation transmise.
- Messieurs Etienne Bovard et Guy Fritsché, directeurs associés chez Bovard & Fritsché SA, pour m'avoir donné la possibilité de réaliser ce travail à plein temps et pour leur soutien.
- Madame Yvette Genoud, pour sa relecture attentive et ses commentaires.

Et pour terminer, ma femme, Stacy, et ma fille, Anya, pour leur patience et soutien ces derniers mois.

Liste des abréviations

AE Surface de référence énergétique selon SIA 380

Ath Surface de l'enveloppe thermique du bâtiment selon SIA 380

BDM Bureau de développement et projet Métamorphose de la Ville de Lausanne

BIM Building Information Modeling
CALV Centre administratif Lausanne-Vidy

CFC Code des frais de construction

DCF Discounted cash flows ou flux de trésorerie actualisés

DDP Droit Distinct et Permanent

EC Eaux claires

INTERLIS Langage de description et format d'échange de géodonnées

IUS Indice d'utilisation du solLLA Logement à loyer abordable

LLM Logement à loyer modéré ou subventionné

LPPPL Loi sur la préservation et la promotion du parc locatif

MEP Mandat d'études parallèles

ML Marché libre

MNT Modèle numérique de terrain

MO Maître d'ouvrage
PA Plan d'affectation
PPE Propriété par étages

SC Surface de construction selon SIA 421
SD Surface de dégagement selon SIA 421

SHP Shapefile - Format d'échange pour les systèmes d'information géographique

SI Surface d'installations selon SIA 421

SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes

SIG Système d'information géographique

SN Surface nette selon SIA 421

SPd Surface de plancher déterminante selon SIA 421

SQL Structured Query Language - Langage normalisé pour l'exploitation des bases

de données

SUP Surface utile principale selon SIA 421
SUS Surface utile secondaire selon SIA 421

UML Unified Modeling LanguageXML Extensible Markup Language

XSD Language permettant de définir la structure et le type de contenu d'un fichier

.xml

1 Introduction

Les développements de nouveaux quartiers immobiliers sont soumis à de nombreuses contraintes opérationnelles. Il est possible de modéliser ces contraintes par des outils de type SIG afin d'anticiper la gestion de ces futurs quartiers du point de vue tant technique que financier ou environnemental. Le principe est de mettre en œuvre des simulations de variantes de développements immobiliers avec indicateurs associés afin de pouvoir les analyser. Ceci pour finalement obtenir un outil d'aide à la décision avec une orientation quantitative pour les maîtres d'ouvrages et responsables de projet. Il s'agit également d'inclure des objectifs d'intérêt public imposés par les politiques publiques comme les aspects sociaux, environnementaux, de durabilité et d'énergie ou encore de mobilité.

Aujourd'hui, les Autorités publiques et développeur de projet immobilier réalisent déjà des estimations de nombre logements/habitants potentiels, coûts, phasage, etc. Cependant, celles-ci se font séparément et souvent par le biais de tableurs type Excel. Ils effectuent ainsi des simulations globales à l'échelle d'un périmètre de quartier entier sans véritablement tenir compte de la composante spatiale des données de base du moins en phases de planification et d'études de projets. En effet, une contrainte opérationnelle comme une pollution de sol, par exemple, peut très bien avoir un impact financier et temporel pour une partie du terrain et non sur son entier. Cet outil doit donc permettre de simuler des variantes de développement en phase d'études de projets que ce soit pour un allotissement ou un périmètre plus large et en fournissant des indicateurs pour de multiples thématiques. Les contraintes et autres données composants le projet sont modélisées puis leur géométrie est prise en considération dans les calculs afin d'obtenir des résultats les plus réalistes possibles.

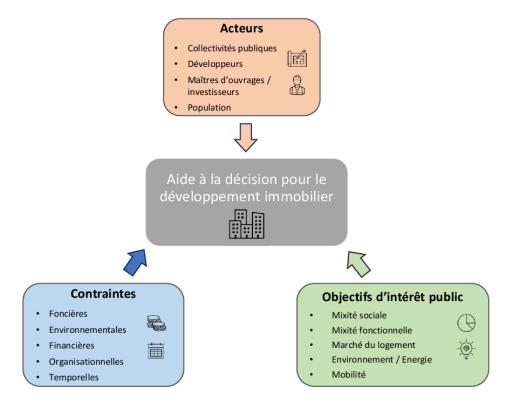


FIGURE 1.1 – Contexte d'aide à la décision pour le développement immobilier.

1.1 Buts et objectifs

Le but principal de ce travail est d'étudier le développement immobilier, en identifiant les contraintes et les besoins pour les acteurs impliqués, sous l'angle d'une approche quantitative complétant les démarches qualitatives (cf. Figure 2.3). Puis, une fois le concept posé, d'illustrer cette approche par un outil d'aide à la décision, sous la forme d'une maquette SIG, destiné a une collectivité publique, des développeurs immobiliers ou des maîtres d'ouvrages en leurs permettant de simuler des variantes de développement avant exécution. Cela permet de se projeter et d'avoir une bonne estimation du phasage, des coûts ainsi que des aspects techniques et de durabilité. L'étude préalable de ces différents points offre également la possibilité d'anticiper les potentielles problématiques en phase de réalisation notamment du point de vue financier et temporel.

Ce travail présente un exemple d'application concrète de cet outil, sous la forme d'une maquette illustrative du futur éco-quartier des Prés-de-Vidy à Lausanne. Ce dernier fait partie du programme "Métamorphose" porté par la Ville de Lausanne ayant pour but d'améliorer l'offre en logements, de développer les infrastructures sportives et les transports publics. Tout cela avec des intentions fortes en imposant la mixité sociale et fonctionnelle, en proposant des logements abordables et en favorisant des constructions durables. Ce mémoire est une approche prospective visant à démontrer l'intérêt de développer un tel outil pour un développement comme celui précité mais également dans l'idée d'être applicable à tout autre projet de quartier que ce soit en milieu urbain, péri-urbain ou en friche.

Les principaux objectifs de cette étude sont ainsi énumérés ci-dessous :

- 1. Réaliser un inventaire des différentes contraintes ayant un impact sur le développement immobilier d'un secteur, dans ce cas aux Prés-de-Vidy à Lausanne.
- 2. Récupérer et structurer les données de base nécessaires aux simulations puis modélisation dans une base de données orientée objet.
- 3. Identifier des indicateurs à sortir qui soient utiles aux acteurs afin de leur permettre de comparer différents scénarios et ainsi définir une stratégie de développement. Chaque indicateur se voit attribuer une méthode de calcul.
- 4. Monter une maquette SIG sur la base du modèle de données créé représentant les entités (aires, périmètres) sur lesquels il est possible d'effectuer des simulations. Renseignement des tables attributaires contenant les informations de base nécessaires au calcul des indicateurs. Programmation de fonctionnalités permettant de générer des rendus statiques et dynamiques ainsi que d'une interface utilisateur.
- 5. Établir de la documentation graphique de communication afin de démontrer l'intérêt du simulateur et de ses résultats.

1.2 Résultats attendus

L'Autorité publique et le développeur s'intéressent à avoir une vision globale du développement à large échelle. Pour fournir des résultats globaux, l'outil doit tenir compte des différentes contraintes opérationnelles qui impactent le site et, par exemple, être capable de faire des propositions de phasage de chantier à partir des délais d'écoulement de ces contraintes. Les aspects financiers sont également importants pour la collectivité publique car un certain nombre de coûts préalables ainsi que le financement des espaces publics lui incombent. Il y a aussi l'intention de faire la distinction entre les dépenses précitées et les recettes qui sont versées par les MO par le biais de taxes ou de rentes. L'outil peut également être bénéfique pour la recherche d'investisseurs en ayant la possibilité de sortir des fiches descriptives de chaque périmètre avec indicateurs et graphiques associés.

Pour le MO, le point fort est de pouvoir simuler des variantes pour un périmètre à petite échelle en modifiant la géométrie des bâtiments ou en adaptant la disposition des aménagement extérieurs. Le rendu peut se faire sous forme d'un rapport avec entre autres un planning représentant les jalons principaux, le résumé des dépenses de la mise à l'enquête à la réalisation, des indicateurs techniques et environnementaux. Tout l'intérêt de l'outil est aussi de pouvoir facilement et rapidement comparer deux variantes entre elles. Par exemple, en évaluant la plus rapide sur la base d'un diagramme de Gantt ou celle qui est la plus rentable en soustrayant les coûts en phase de réalisation aux recettes estimées en phase d'exploitation.

1.3 Structure du rapport

La première partie consiste à effectuer un état de l'art présentant les modes et les acteurs du développement immobilier. Quelques exemples d'outils existants y sont présentés ainsi qu'une brève introduction sur les aspects de durabilité et d'énergie dans la construction. Concernant ce dernier point, l'outil de calcul de consommation énergétique et durabilité "SméO" est avancé car il fait l'objet d'une complémentarité éventuelle avec l'outil développé dans le cadre de ce travail.

Le concept de modélisation avec une approche quantitative du développement immobilier est ensuite présenté dans le chapitre suivant en posant les bases pour le développement de l'outil et en démontrant l'intérêt apporté aux utilisateurs.

Le développement en lui-même est détaillé dans le chapitre 4 avec l'application concrète sur le projet des Prés-de-Vidy à Lausanne. Description et inventaire des contraintes et données de base associées à ce secteur de développement puis montage de la maquette SIG.

Finalement, une discussion sur les résultats obtenus est menée en prenant du recul sur le travail réalisé. Les perspectives permettent d'entrevoir les améliorations possibles pour l'outil et la conclusion tire un bilan général du travail réalisé.

2 Mécanismes généraux et démarches actuelles dans le développement immobilier

Ce chapitre permet d'introduire le contexte du développement immobilier en amenant des notions générales en matière de planification et gouvernance de projet. Puis, les principaux acteurs intervenant dans un développement immobilier ainsi que leurs rôles sont présentés. Finalement, quelques exemples d'outils d'aide à la décision existants sont amenés. Toutes ces notions permettent de poser un cadre dans lequel s'insère l'outil faisant l'objet de ce travail.

2.1 Processus de développements immobiliers

Le développement immobilier n'est pas une science exacte car il dépend du lieu, de la législation et du mode de gouvernance. Il existe différents processus permettant de mener un développement immobilier à bien. Dans la plupart des cas, deux acteurs principaux peuvent être à l'initiative d'un tel projet à savoir une collectivité publique (Canton ou Commune) ou, à l'opposé, un privé que ce soit un propriétaire foncier ou une société immobilière, par exemple. Les intentions de développement ne sont pas toujours les mêmes car, sur le principe, l'un répond à des objectifs d'intérêt public et l'autre souhaite obtenir le meilleur rendement possible en générant des plus-values foncières. Néanmoins, les différences ne sont pas très grandes car les objectifs d'intérêt public sont très souvent imposés par des bases légales de droit public ou des instruments de planification (PA). La planification territoriale est similaire pour tout mode de gouvernance car elle dépend de la législation cantonale et fédérale. En effet, il y a systématiquement une planification stratégique avec l'élaboration de plans directeurs qui définissent les grandes intentions de développement à l'échelle cantonale voire communale ou pour une agglomération. Ces plans directeurs sont contraignants pour les autorités et ne sont pas opposables aux tiers. Puis, à l'échelon communal, ces stratégies générales sont encore plus détaillées dans des plans d'affectation (PA) qui définissent, à l'échelle d'un quartier ou d'une Commune, l'affectation des sols, les densités maximales par zones, les gabarits de construction, les itinéraires de mobilité, les espaces publics et de verdure ou encore les aspects environnementaux (protection des eaux, forêt, sensibilité au bruit). Ceux-ci sont contraignants pour les particuliers et opposables aux tiers (cf. Figure 2.1). Une fois les terrains affectés et constructibles, il est possible pour un propriétaire de monter un projet, le déposer à l'enquête publique pendant trente jours puis, s'il n'y a pas d'oppositions et de recours, obtenir un permis de construire.

Pour ce qui est de la planification et de la gouvernance d'un projet de développement immobilier, la collectivité publique, que ce soit un Canton ou une Commune, répond à des enjeux de politique publique comme le manque de logements, favoriser les loyers abordables, ajouter des équipements publics (écoles, infrastructures sportives) ou encore promouvoir la mobilité douce en améliorant la desserte en transports publics. Elle dresse ainsi un schéma directeur dans le Canton de Vaud ou un plan directeur de quartier (PDQ) à Genève qui permet de transcrire ces intentions stratégiques en les intégrant dans le contexte du site de développement. Ainsi l'Autorité publique peut adapter la densité future (nombre de logements) pour répondre aux besoins de la population (cf. Figure 2.2). A Genève, par exemple, l'État peut facilement mettre à l'enquête publique une modification de limite de zone

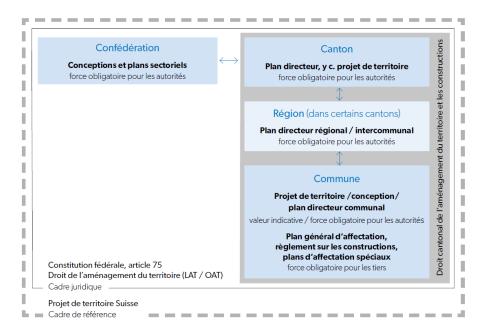


FIGURE 2.1 - Système de planification suisse (BÜHLMANN, 2021).

dans un secteur précis pour, par exemple, passer d'une zone d'habitations individuelles à une zone de développement permettant une densité trois à cinq fois supérieure.

Puis arrivent les négociations avec les propriétaires fonciers qui disposent des terrains pour répartir les droits à bâtir et remanier le parcellaire. Du point de vue de la gestion du foncier, les autorités disposent également d'outils légaux leur permettant de s'imposer sur l'achat d'un terrain ou de forcer les propriétaires à remembrer leurs parcelles (VILMIN, 2015). Dans le Canton de Vaud, par exemple, il existe une loi sur le logement (LPPPL) qui octroie un droit de préemption aux Communes afin qu'elles puissent acquérir, sous certaines conditions, un immeuble en s'imposant lors d'une vente pour autant qu'elles s'alignent au prix fixé. La loi sur les améliorations foncières (LAF) permet d'imposer un remaniement parcellaire et dans certains cas la loi sur l'expropriation (LEx-VD) autorise l'autorité à ôter tout ou partie des droits de propriété mais uniquement dans le cas où une législation de droit public le prévoit.

Quartier	Surface brute de	Nombre	Surface brute de	Surface brute de
	plancher (SBP)	de	plancher (SBP)	plancher (SBP)
	Logements	logements	Activités & services	Équipements
A1 _ Arbères	35'300 m ²	341	1'500 m ²	10'000 m ²
A 2 _ Arbères	5'000 m ²	46		
B _ Vergers	32'000 m ²	296	800 m ²	800 m ²
C1 _ Sports	32'800 m ²	303	3'500 m ²	
C2 _ Sports			11'000 m ² *	7000 m ² *
Total	108'300 m²	986	16'800 m²	<i>17'800</i> m ²

FIGURE 2.2 – Programme du PDQ n° 29'500 - 526 - les Vergers (ETAT DE GENÈVE - DIRECTION DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, 2006).

Le financement des équipements publics et infrastructures (réseaux, espaces publics) fait aussi l'objet d'intenses négociations entre Canton, Commune, propriétaire foncier et MO. Il s'agit de bien définir, en amont de la réalisation, les rôles et obligations de chacun des acteurs du point de vue

financier. Typiquement, les équipements publics comme les écoles ou les crèches, ayant un intérêt régional, peuvent être financés en tous cas partiellement par le Canton en plus de la Commune. Les autres équipements et les espaces publics majeurs comme les places ou parcs publics sont généra-lement financés par la Commune puis tout ce qui est des accès, réseaux et autres aménagements par les propriétaires et maîtres d'ouvrages via des taxes. Dans la pratique, cela n'est évidemment pas toujours si simple de mettre tout le monde d'accord surtout lorsqu'on est dans la situation d'un développement immobilier avec une multitude de propriétaires fonciers ayant chacun des intérêts à faire valoir.

Une fois les aspects fonciers et financiers mis au clair, les PA ou PLQ sur Genève sont dressés avec des objectifs quantitatifs définis pour la densité, la mixité, les aspects environnementaux, énergétiques et de mobilité. A partir de là, le développeur immobilier et les propriétaires fonciers lancent des mandats d'études parallèles (MEP) en collaborant avec des mandataires spécialisés. Cette étape permet de définir des pièces urbaines avec une morphologie du bâti ainsi qu'un projet d'espaces publics. Chaque propriétaire se voit ensuite attribuer une pièce urbaine avec plusieurs lots pour lesquels il peut chercher des investisseurs qui réaliseront les bâtiments et leurs aménagements. Des structures foncières comme des biens-fonds ou des DDP peuvent être utilisées sur les lots pour respectivement vendre le terrain à l'investisseur ou le louer pour une durée de 30 à 100 ans. Cette deuxième possibilité permet au propriétaire de garder la maîtrise foncière et de toucher des rentes pour la mise à disposition du terrain. Ainsi, il ne se préoccupe pas de la réalisation et de l'exploitation des bâtiments tout en ayant un rendement sur son investissement initial.

En amont des phases de réalisation puis d'exploitation des bâtiments, un grand intérêt est porté par les investisseurs potentiels à évaluer le risque et la rentabilité des projets. Il y a plusieurs facteurs de risques qui peuvent être pris en considération comme la soudaine indisponibilité des terrains si l'affectation change, la grande quantité de mandataires aux honoraires divers et imprévisibles ou encore la surévaluation des loyers ou du prix de vente par le propriétaire. La rentabilité est évaluée en estimant le rendement attendus sur la durée de vie d'un ouvrage selon l'exploitation qui y est prévue. Elle dépend donc des divers facteurs de risques précités mais aussi des niveaux de loyers ainsi que des structures foncières définies (DDP, Biens-fonds).

2.1.1 Contexte qualitatif

De façon générale, le développement immobilier est ainsi un processus entouré d'une multitude de domaines qui interagissent avec lui et qui forment son contexte qualitatif. Quel que soit le projet de développement et sa gouvernance, différentes thématiques interviennent comme celles traitant de l'aménagement du territoire, de la mobilité, de l'environnement, de l'énergie, du logement, de l'architecture ou encore de l'urbanisme (cf. Figure 2.3).

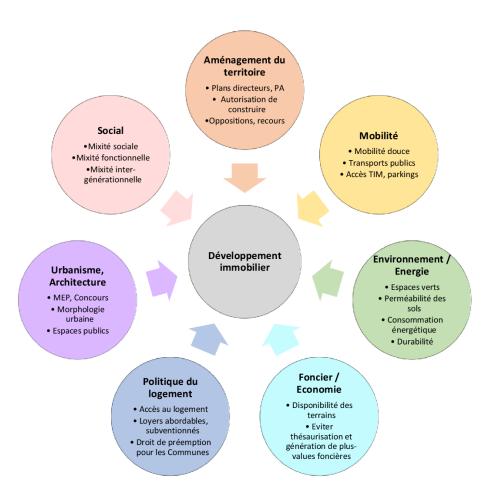


FIGURE 2.3 – Contexte qualitatif du développement immobilier.

2.2 Acteurs du développement immobilier

Une multitude d'acteurs interviennent dans le cadre d'un développement immobilier allant du maître d'ouvrage (MO) aux différents mandataires oeuvrant sur un projet de construction. Les acteurs principaux qui sont à l'origine de ces grands projets et qui interviennent dès le début de la phase de planification, sont présentés ci-après.

2.2.1 Propriétaire foncier

Le propriétaire foncier est celui qui détient la maîtrise foncière. En d'autres termes, c'est celui qui est maître de son terrain et qui a le pouvoir de le construire si celui-ci est propre à la construction et équipé. Propre à la construction signifie qu'aucune restriction de droit public ou privé n'empêche son développement. Par exemple, on peut imaginer qu'une parcelle soit hors de la zone à bâtir selon un plan d'affectation ou encore que des servitudes foncières imposent des gabarits de construction voire interdisent son développement.

Le propriétaire foncier peut financer et construire lui-même ses ouvrages en prenant la casquette de MO ce qui est le cas de la plupart des projets de construction à petite et moyenne échelle. Il va ainsi mandater un architecte qui l'épaulera en dirigeant les travaux et en sélectionnant des manda-

taires sur appel d'offres. Pour des projet de plus grande envergure, plusieurs propriétaires peuvent être impliqués et peuvent être des privés, des autorités publiques ou des sociétés. S'il s'agit d'un projet en main publique, l'autorité va chercher à répondre à des enjeux de politique publique (besoins en logements, loyers abordables, durabilité, etc.) en faisant construire les bâtiments par des investisseurs tout en imposant ses conditions et en augmentant la valeur de son terrain. A l'opposé, un propriétaire privé cherche à avoir un grand rendement en construisant des logements privatifs, par exemple, pour les vendre au meilleur prix et ainsi maximiser son retour sur investissement.

2.2.2 Autorité territoriale

L'autorité territoriale est celle qui impose les règles en matière d'aménagement du territoire mais aussi dans d'autres domaines comme la mobilité, l'environnement ou encore la politique en matière de logement. En Suisse, il s'agit des Cantons qui édictent des lois pour l'ensemble de ces politiques publiques tout en respectant les principes directeurs définis par les lois fédérales. Les Communes peuvent bien sûr édicter des lois et réglementations encore plus détaillées.

Dans le cadre d'un développement immobilier, l'autorité territoriale est l'organe de contrôle lors de la phase de planification. En effet, lors de l'élaboration du plan d'affectation (PA), elle détermine si l'aménagement urbain planifié est conforme aux réglementations et lois en vigueur et donne ou non son approbation. Les stratégies de développement envisagées par la Commune sont analysées notamment pour ce qui est des itinéraires de mobilité douce, de la densité bâtie, de la consommation énergétique ou de l'intégration de logements abordables.

2.2.3 Développeur immobilier

Lors des phases d'études et de réalisation, le développeur immobilier, qui est généralement mandaté par le propriétaire foncier, tient le rôle de programmateur puis de coordinateur. Il va se charger de gérer des études préliminaires en mandatant des entreprises spécialisées qui analysent le site du point de vue environnemental, paysager, de la mobilité et évaluent l'impact qu'a le projet de développement sur celui-ci. Le développeur établit aussi une stratégie foncière et énergétique en menant des négociations entre propriétaires et Autorité. Il lance ensuite des mandats d'étude parallèles (MEP) ou un concours d'urbanisme avec plusieurs entreprises participantes pour aboutir sur un schéma directeur du futur quartier fixant les lignes directrices du développement pour le site en question. En parallèle, il organise des démarches participatives pour sensibiliser la population et faciliter l'acceptation du projet. Une fois des études de faisabilité réalisées, une image directrice est arrêtée puis le développeur suit l'élaboration du plan d'affectation, définit des allotissements et les espaces publics pour ensuite passer à la recherche des investisseurs. Finalement, il lance les travaux préparatoires avec éventuelles démolitions, dépollutions, fouilles archéologiques, etc. puis établit des contrats avec les MO pour passer à la phase de réalisation. Lors de la construction, il gère la coordination globale entre les mandataires et maîtres d'ouvrage pour l'ensemble du quartier et organise le phasage de chantier en fonction de son planning initial et des contraintes.

2.2.4 Maître d'ouvrage / investisseur

En fonction des situations, le MO, qui est confondu avec l'investisseur pour ce travail, peut être un simple propriétaire privé, une autorité publique comme une Commune ou un Canton, une société immobilière ou encore une coopérative. N'ayant ainsi pas toujours les compétences et les ressources nécessaires pour mener à bien de tels projets, le MO peut s'entourer d'un mandataire qui endossera le rôle de BAMO (Bureau d'assistance au maître d'ouvrage). Ce dernier se charge de toute la phase d'études avec l'élaboration du cahier des charges puis le choix des entreprises en pilotant un appel d'offres et mener à des demandes d'autorisation de construire. Puis, lors de la réalisation, il se charge de la direction des travaux et du suivi de chantier avec la coordination entre les mandataires sur les ouvrages dont il a la maîtrise. Le MO porte un intérêt particulier à minimiser les risques financiers en obtenant un rendement maximum sur son investissement initial (Domer et al., 2017). Il réalise pour cela différentes projections financières en estimant les coûts, lors de la réalisation, et les recettes, en phase d'exploitation, selon un taux d'intérêt défini et ce pour toute la durée de vie de l'ouvrage. Ainsi dans la plupart de cas, le MO tient également le rôle d'investisseur car c'est lui qui amène le financement initial pour construire les bâtiments et et payer les taxes pour n'obtenir un retour sur investissement qu'à long terme. Il est aussi possible que le MO mandate un investisseur qui tient alors le rôle de créancier mais, comme précité, dans le cadre de ce travail l'investisseur et le MO sont confondus.

2.2.5 Mandataires

Les mandataires dans un projet de développement immobilier sont toutes les entreprises qui sont engagées tout au long du processus. Ils sont généralement mandatés par des Autorités publiques en phase de planification, des développeurs immobiliers lors des études préliminaires puis par des MO ou investisseurs en phase de réalisation puis d'exploitation. Au début de la procédure, les besoins en mandataires sont dans les domaines de l'urbanisme (PA), du paysage, de l'environnement, de la mobilité, du foncier et de l'énergie. Puis lors des études de projets et de l'exécution des ouvrages, des compétences sont nécessaires en architecture, direction de travaux, génie-civil, aménagements paysagers et dans tous les métiers de la construction (gros oeuvre, technique du bâtiment, aménagements intérieurs). Au stade de l'exploitation, des mandataires sont également nécessaires pour des aspects d'entretien et de gestion. Il n'y a pas de lien direct entre les mandataires et l'outil développé dans le cadre de ce travail mais ils restent un acteur essentiel du développement immobilier.

2.2.6 Population

La population est aussi un acteur essentiel dans ces grands projets. En effet, les futurs quartiers amènent non seulement des logements mais aussi des infrastructures publiques, des activités et des espaces de délassement qui peuvent être au bénéfice d'un plus grand bassin de population. Il est ainsi important d'impliquer les habitants alentours dès le début de la planification afin de prendre en compte les besoins locaux et les intégrer au mieux dans un développement urbain. Pour cela des démarches participatives sont organisées par les Autorités ou les développeurs immobiliers et cela permet d'informer la population dès le début de processus pour améliorer l'acceptation d'un projet

sur le long terme en prenant en compte ses intérêts.

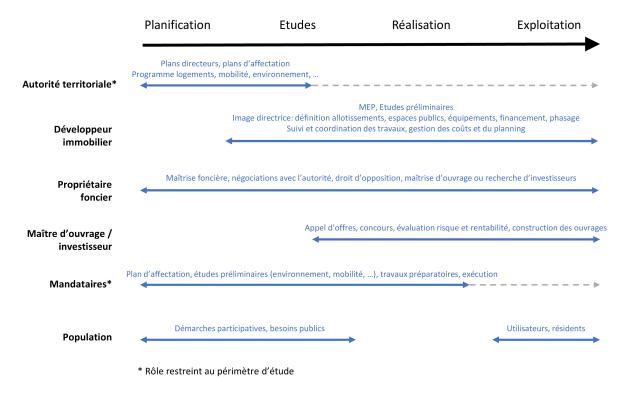


FIGURE 2.4 – Acteurs du développement immobilier et leurs rôles.

2.3 Outils d'aide à la décision

Dans le domaine de l'immobilier, il existe déjà passablement d'outils d'aide à la décision en ce qui concerne les aspects financiers destinés aux investisseurs ou le côté plus opérationnel avec la programmation d'un point de vue foncier et urbanistique. Pourtant, il n'y a actuellement pas tellement d'outils donnant un appui tant aux développeurs qu'aux maîtres d'ouvrage en regroupant les données de base d'un projet immobilier et des contraintes qui ont un impact financier et organisationnel. Cela est précisément le but de ce travail en permettant l'aide à la décision au travers d'indicateurs techniques, environnementaux, énergétiques, financiers et de phasage de chantier. Mais avant cela, il faut analyser les appuis financiers et techniques existants.

2.3.1 Aspects techniques

Il existe quelques outils permettant déjà d'effectuer des simulations en matière de développement urbain et de phasage. La société Spatiomatics, par exemple, a développé l'application SIMO permettant de simuler un développement de quartier avec la possibilité de modéliser une maquette en 3D et d'en sortir des indicateurs techniques et de phasage (cf. Figure 2.5). Le projet peut être analysé en temps réel en générant des graphiques représentant la mixité fonctionnelle ou encore la répartition des surfaces avec indices de densité. Ces rendus peuvent être générés pour différentes entités comme un quartier entier, une pièce urbaine ou encore un lot. Il y a également une gestion du phasage de chantier en tenant compte d'autres éléments modélisés tels que des contraintes et des infrastruc-

tures (équipements, mobilité).

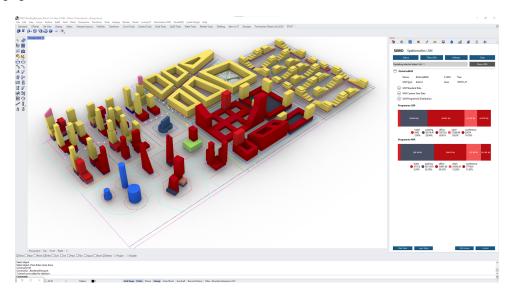


FIGURE 2.5 – Simulateur SIMO (SPATIOMATICS, 2023).

Un autre simulateur appelé Urbano, développé par ES Lab, est utilisé plutôt pour des simulations en matière de mobilité en relation avec un développement immobilier. Il permet notamment d'estimer les flux de personnes par tronçons en fonction de la densité d'habitants projetée et des futurs commerces et activités. Cela permet également d'implanter judicieusement les équipements et infrastructures d'utilité publique en estimant les itinéraires probables sur la base d'une maquette.

Pour une application à une échelle plus large, il existe en France l'outil UrbanSIMUL, développé par l'INRA et le Cerema, qui propose de l'aide à la décision destinée aux acteurs publics (Commune, région). Il permet de visualiser les disponibilités foncières ainsi que les capacités constructives des terrain nus et ce sur tout un territoire (cf. Figure 2.6). Tout comme le simulateur faisant l'objet de ce travail, UrbanSIMUL donne la possibilité de générer des rapports par entité contenant une série d'indicateurs principalement sur les aspects légaux et de densité. L'application peut aussi simuler l'état futur d'une Commune en faisant des scénarios d'évolution en matière d'urbanisme (zonage) et de réglementation des constructions. L'affichage des résultats se fait sur une interface cartographique de type SIG ce qui permet aux acteurs publics d'analyser facilement les résultats qui se superposent aux plans de zones auxquels ils sont habitués.

2.3.2 Aspects financiers

Il est souvent question d'estimer la valeur du terrain et la rentabilité d'un projet de développement immobilier en fonction de la plus-value générée. Pour cela, il faut bien sûr estimer l'ensemble des coûts à partir de la planification en passant par la réalisation puis l'entretien d'un ouvrage ou d'un quartier. Un investisseur peut ainsi savoir, avant même la construction, si son projet est rentable et à partir de quand il aura un retour sur investissement. Il existe plusieurs méthodes de calcul de rentabilité, on peut citer par exemple celle de l'actualisation des flux financiers futurs ou discounted cash flows (DCF). Elle se base sur la projection des dépenses et recettes tout au long du développement et de l'exploitation d'un ouvrage ainsi que sur la valeur temporelle de l'argent. En effet, en fonction des

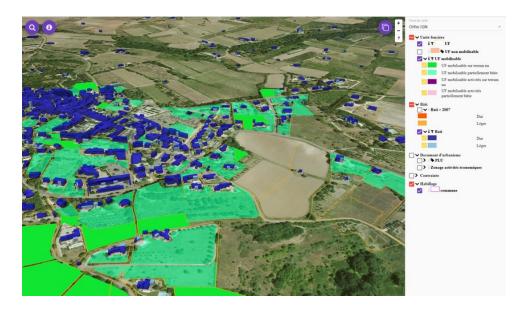


FIGURE 2.6 – Mise en évidence de terrains nus constructibles (LEROUX et CEREMA OUEST, 2018).

fluctuations du coût de l'argent, CHF 1'000.- investis aujourd'hui n'auront pas la même valeur dans 10 ou 20 ans (Belk, 2012).

D'autres systèmes d'estimation immobilière comme la méthode hédoniste ou celle de la valeur intrinsèque sont plus simples et plus facilement utilisées pour chiffrer une valeur vénale ¹. Les deux sont très fiables pour des biens existants ayant très peu ou pas de rendement à savoir les logements en propriété (villas, appartements en PPE). La méthode hédoniste consiste à décomposer la valeur des biens en différents critères (situation, année de construction, surfaces, nombre de pièces, etc.) auxquels des poids sont attribués. La valeur intrinsèque, quant à elle, se base sur la valeur actuelle du terrain, du bâti et des aménagements extérieurs autrement dit la valeur à neuf moins la vétusté (EBERHARD, 2022).

Les méthodes précitées permettent de calculer les revenus sur le long terme une fois les bâtiments construits. Afin d'avoir une estimation des dépenses avant le développement d'un projet immobilier, il faut également chiffrer l'investissement initial pour la construction et les différents frais d'études associés. Pour cela, il existe des coûts moyens par mètre carré ou mètre cube en fonction du type d'ouvrage et des choix constructifs. Des normes comme le code des frais de la construction (CFC) sont utilisées pour cela. La planification financière liée aux équipements et espaces publics est également importante car certains aménagements ou infrastructures doivent être réalisés en amont des bâtiments et engendrent des coûts dont le financement doit être réparti entre les acteurs.

2.3.3 Aspects de durabilité et d'énergie

Au vu du réchauffement climatique dû à la surconsommation énergétique mondiale, les lois et réglementations en matière de construction sont de plus en plus strictes. Les bâtiments sont optimisés de façon à minimiser leur consommation pour ce qui est du chauffage, de l'eau chaude, de l'électricité mais aussi de l'énergie grise consommée lors de la production des matières premières et pendant

^{1.} prix de vente d'un bien immobilier par rapport au marché à une certaine date

le chantier. Cela passe par une utilisation prioritaire des énergies renouvelables (solaire, géothermie, ...), un choix adapté des matériaux de construction, une architecture bien pensée pour éviter les déperditions de chaleur, une gestion de chantier efficace et coordonnée. Le Canton de Vaud a établi une stratégie en matière d'efficacité énergétique et durabilité des bâtiments ayant comme point de mire la réduction de 50% à 60% des émissions de CO² d'ici à 2030 puis la neutralité carbone à l'horizon 2050. Ces objectifs découlent directement du plan climat vaudois qui reprend les engagements pris par la Suisse aux accords de Paris (GOLAY et al., 2022).

Au niveau des bases légales, on retrouve la loi fédérale sur l'énergie (LEne) qui définit les buts et principes en matière d'approvisionnement, de production et de consommation d'énergie en Suisse en mettant l'accent sur les énergies renouvelables. A l'échelon cantonal, la loi vaudoise sur l'énergie (LVLEne) et son règlement détaillent ces principes en encourageant la production renouvelable et en imposant une part minimale de ces énergies vertes pour les besoins en eau chaude et électricité. L'État réglemente également la production de chaleur en interdisant les chauffages électriques et en fixant des parts d'approvisionnement maximum pour le mazout, le charbon ou le gaz (ETAT DE VAUD, 2006). Puis, il existe diverses démarches pour qualifier une construction comme étant durable selon plusieurs exigences. On peut citer des noms comme SIA 112/1, SméO, SEED - Next Generation Living, Minergie-P ECO ou encore Ecobau qui sont de plus en plus courantes dans les projets immobiliers actuels. Dans le cadre de ce travail, on se focalise sur l'outil de durabilité SméO qui est développé par la Ville de Lausanne.

SméO SméO (Sols, Matériaux, Energie et Eau) est un outil développé depuis 2008 par l'État de Vaud et la Ville de Lausanne. Tous deux ont préalablement développé des démarches similaires et complémentaires en matière de construction durable se basant sur les mêmes règlements et normes tels que la SIA 112/1. Il paraissait donc évident de regrouper ces connaissances en un seul outil permettant d'évaluer la durabilité d'un bâtiment et de répondre à des objectifs stratégiques menant à une certification telle que "Minergie ECO ®". En plus du label proposé par Minergie qui a pour but de réduire l'impact environnemental à la construction et à l'exploitation, SméO ajoute des notions de réduction de la consommation de CO² sur l'ensemble du cycle de vie et réduction des charges de chauffage. SméO définit le cycle de vie d'une construction en cinq étapes que sont genèse, matérialisation, utilisation, entretien et déconstruction (ROULET et LIMAN, 2009).

Du point de vue fonctionnel, l'outil se base sur un certains nombre de données en entrée qui font l'objet d'une analyse multicritères selon la méthode "Hermione". Cette dernière est fondée sur trois principes de base à savoir l'exhaustivité, la non-redondance et l'équilibre de l'importance. Autrement dit, il doit y avoir tant des critères qualitatifs que quantitatifs et ceux-ci doivent représenter toutes les phases d'un projet. De plus, il ne doivent pas être utilisés plusieurs fois et des poids leurs sont attribués en fonction de leur importance (ROULET et LIMAN, 2021). Ces critères sont renseignés par un maître d'ouvrage au travers de l'interface SméO. Premièrement, les données générales du projet avec les différents mandataires et la localisation. Puis, les aspects plus techniques avec les surfaces et volumes, le type et le nombre de logements et d'activités prévus, les matériaux utilisés, les besoins en chauffage, la proximité des transports et commerces, le nombre de places de stationnement ou encore les aspects financiers. Finalement, l'utilisateur peut lancer l'analyse multicritères et ainsi obtenir

des résultats graphiques et chiffrés quant à la durabilité et l'impact de son projet sur l'environnement permettant de l'optimiser au mieux dans le but d'obtenir une certification. En effet, SméO propose un label décliné en deux variantes SméO^{ÉNERGIE} et SméO^{ÉNERGIE} et SméO^{ÉNERGIE} en fonction du respect des différentes exigences (ROULET et LIMAN, 2021).

Un des buts de ce travail est de pouvoir développer un outil d'aide à la décision qui permette de chiffrer une bonne partie des données demandées par SméO en amont. Cela permet de créer une complémentarité en ayant la possibilité d'exporter certains indicateurs calculés, principalement techniques (surfaces, volumes, facteur d'enveloppe), qui sont attendus par SméO afin de pouvoir par la suite évaluer la durabilité des constructions.

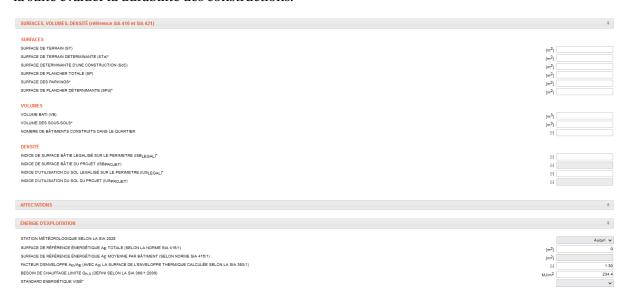


FIGURE 2.7 - Indicateurs techniques demandés par SméO en entrée (ROULET et LIMAN, 2021).

3 Modélisation du développement immobilier avec une approche quantitative

Le développement immobilier est, comme évoqué précédemment, entouré d'un grand nombre de politiques publiques qui amènent à intégrer les projets dans un contexte qualitatif. Cependant, tout au long du processus, il y a également beaucoup d'objectifs quantitatifs qui doivent être intégrés. Dès la phase de planification, il peut y avoir des enjeux politiques comme une pénurie de logements obligeant l'Autorité publique à mettre en évidence des sites potentiels de développement sur lesquels on peut réaliser un certain nombre de logements et d'habitants selon un facteur de densité défini. Une politique environnementale peut également imposer un certain ratio de surface de verdure pour compenser les futurs constructions ou créer des barrières écologiques. Ces aspects, purement quantitatifs, sont des exemples qui montrent l'importance de faire des simulations chiffrées dès le début d'un grand projet. Bien sûr, dans la phase d'études il y a encore bien plus d'indicateurs quantitatifs financiers, environnementaux, techniques, énergétiques qui peuvent être simulés et fournir une aide à la décision à destination de certains acteurs. Ce travail va permettre de démonter l'intérêt d'un simulateur de variantes pour le développement immobilier en amenant un outil SIG qui tient compte de différentes contraintes et de leurs impacts non seulement quantitatifs mais aussi géographiques. L'outil a ainsi pour but de fournir uniquement des résultats quantifiables et non de démontrer la bonne intégration d'un projet dans son contexte qualitatif.

Qualitatif	Quantitatif
Qualité des	Indices de densité
aménagements	Périmètres
Types de revêtements	d'implantation
Bâti, espaces publics,	Surfaces, volumes
aménagements	Coûts
Perméabilité des sols	Surfaces imperméables
Société à 2000 Watts	Facteur d'enveloppe
Mixité	Nombre d'habitants
Qualité des logements	Nombre de logements
Intégration sociale	par type

FIGURE 3.1 – Exemples de différences entre les aspects qualitatifs et quantitatifs.

3.1 Contraintes

Énormément de contraintes peuvent impacter un projet immobilier. Celles-ci peuvent être de différentes catégories et intervenir à des phases différentes. Il est possible de sortir trois catégories générales que sont les contraintes légales, foncières et opérationnelles.

3.1.1 Légales

Les contraintes légales sont celles qui sont amenées par les politiques publiques qui obligent les propriétaires et MO à construire et aménager selon certaines conditions. Différentes bases légales fédérales, cantonales et communales imposent certains critères quantitatifs qui contraignent le futur développement (cf. tableau 3.1).

Impacts		Mesures	
Aménagement du	Affectation du sol, densité, procé-	Règles constructives, indices de	
territoire	dures, délais	densité, mise à l'enquête, droit de	
		recours, compensation SAU	
Politique du	Répondre à la pénurie de loge-	Nombres minimums de logements	
logement	ments, mixités sociale, fonctionnelle	et d'activités, intégrer des logements	
et inter-générationnelle imposées		à loyers abordables et modérés	
Environnement /	Gestion des eaux, pollutions de sol,	Étude d'impact, Perméabilité des	
énergie	Espaces verts, minimiser la consom-	sols, toitures végétalisées, utilisation	
	mation énergétique	d'énergies renouvelables, choix des	
		matériaux	
Mobilité	Mobilité douce à favoriser, station-	Étude de trafic, itinéraires de mobi-	
	nement véhicules à limiter	lité douce, places vélos, accès TIM,	
		parkings	

TABLEAU 3.1 - Contraintes légales, impacts et mesures.

3.1.2 Foncières

La gestion du foncier est un aspect primordial du développement immobilier et qu'il est nécessaire de traiter dès la phase de planification afin d'éviter les désaccords sur le tard entraînant des procédures administratives et des délais importants. Il est nécessaire de définir les usages des sols futurs (construction, équipements, espaces publics) qui nécessitent un remaniement du parcellaire et de mener des négociations. Ces dernières sont essentielles lorsque l'on a un site de développement qui est composé de multiples propriétaires fonciers qui ont des intérêts divergents. Puis vient la répartition des droits à bâtir et le choix des structures foncières pour la réalisation et l'exploitation du quartier (cf. tableau 3.2).

	Impacts	Mesures	
Usages des sols	Remaniement parcellaire, négocia-	Adapter le foncier selon la répar-	
	tions, indemnités	tition des équipements et espaces	
		publics, Préserver les ouvrages exis-	
		tants à conserver	
Propriétaires	Trouver un accord, délais	Gestion et financement des équipe	
multiples		ments et espaces publics. Qui paie	
		quoi? Qui est responsable de quoi?	
Répartition droits	Négociations, délais, indemnités	Définir une clé de répartition selon	
à bâtir		les voeux et valeur foncière initiales	
Location/vente	Perte maîtrise foncière	Structure foncière, calcul de rente	
terrain		ou prix de vente, contrats avec	
		conditions	

TABLEAU 3.2 – Contraintes foncières, impacts et mesures.

3.1.3 Opérationnelles

Les contraintes opérationnelles interviennent au stade de l'exécution dès le début des travaux préparatoires. Elles peuvent être divisées en trois sous-catégories qui concernent les aspects financiers, organisationnels et techniques.

Financières Les contraintes de type financières sont bien évidemment celles ayant un impact sur les coûts. En réalité, peu importe la problématique cela va forcément engendrer des frais à un moment ou un autre et de façon directe ou indirecte. Si une terre est polluée, il va falloir ôter la couche concernée puis l'évacuer et la traiter. Pour des bâtiments à démolir, il faut mandater une entreprise spécialisée et mettre les matériaux en décharge sans parler d'un éventuel désamiantage. La présence d'un sol instable entraîne la réalisation de fondations plus profondes et de mesures de stabilisation. Il s'agit là d'exemples de coûts directs mais il y en a également que l'on peut qualifier d'indirects car ils sont occasionnés par les effets secondaires d'une contrainte. Typiquement, la mise en place d'installations de chantier, de zone de stockage ou la réalisation des infrastructure et équipements vont influer sur le phasage et ainsi sur la durée du chantier ce qui augmente le coût global.

Organisationnelles En plus des coûts, les contraintes organisationnelles engendrent des délais avant lesquels on ne peut pas construire et qui prolongent la durée totale du projet. Typiquement, des dépollutions de sol ou démolitions de bâtiments existants sont des procédures qui doivent être entreprises avant de pouvoir construire. Comme cité précédemment, les installations de chantier, grues, zones de stockage et infrastructures doivent être planifiés et implantés minutieusement et cela implique que les différents allotissements d'un futur quartier ne pourront pas tous être construits simultanément.

Techniques Certaines contraintes imposent des mesures techniques qui bien sûr génèrent des coûts mais pas forcément de délais supplémentaires. Il s'agit, par exemple, de mesures pour réduire ou atténuer le bruit au sens de l'OPB qui nécessitent, par exemple, de choisir des matériaux d'ossature spécifiques ou de limiter les ouvertures en façades le long des voies à fort trafic. D'autres ordonnances légales comme l'OPAM ou l'OPAir peuvent également imposer ce genre de mesures lors de la construction des bâtiments. On peut également citer la nécessité éventuelle de réaliser un cuvelage du sous-sol avec fondations profondes lorsqu'on est en présence d'eau souterraine.

	Impacts	Mesures	
Financières	Coûts	Identifier les coûts, taxes en fonction des ac-	
		teurs et de leurs responsabilités.	
Organisationnelles	anisationnelles Délais Définir un planning de chantier en f		
		des contraintes, de leur échéance et localisa-	
	tion.		
Techniques Règles constructives, coûts Minimiser les nuisances et favo		Minimiser les nuisances et favoriser la dura-	
		bilité par des choix techniques de construc-	
		tion.	

TABLEAU 3.3 – Contraintes opérationnelles, impacts et mesures.

3.2 Intérêt d'un outil de simulation

Le développement immobilier est composé de quatre grandes étapes que sont la planification, les études préliminaires et de projet, la réalisation puis l'exploitation. L'intérêt de cet outil est de pouvoir proposer de l'aide à la décision en phase d'études principalement. C'est en effet à cette étape que l'aide à la décision permet une certaine anticipation en optimisant le phasage ou en évitant les surcoûts et les retards lors des étapes suivantes. Cependant, les projets à ce stade ne sont pas encore très détaillés que ce soit au niveau de la morphologie urbaine ou des espaces publics.

Les données à disposition à ce stade sont souvent des schémas directeurs avec une projection des espaces publics et bâtis, un plan d'affectation ou encore une répartition provisoire des allotissements. Toutes ces données de base sont généralement disponibles en 2D voire en 3D extrêmement simplifiée avec des bâtiments projetés qui ne sont rien de plus que des rectangles extrudés. Toutefois, en phases de planification et d'études, la 2D correctement gérée dans un SIG avec des informations attributaires de hauteur ou profondeur permettant de calculer des volumes et coûts associés est généralement suffisante. Il est bien clair que, si des simulations doivent être réalisées de façon plus détaillées lors de la réalisation ou l'exploitation, une gestion des données en 3D avec interface BIM est nécessaire.

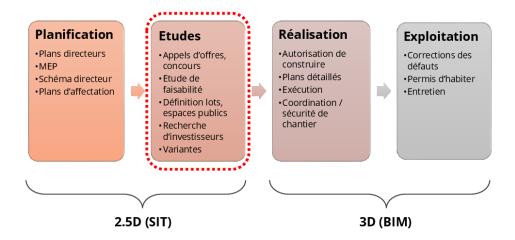


FIGURE 3.2 - Contexte d'application dans les grandes phases du développement immobilier.

3.2.1 Acteurs visés

Les acteurs ciblés pour l'utilisation d'un tel outil en phase d'études sont l'Autorité publique dans le cas d'un développement en main publique, le développeur immobilier ainsi que les maîtres d'ouvrage. Chacun de ces acteurs a des intérêts à faire valoir à différentes échelles du projet. Ces dernières sont qualifiées comme suit : globale (G), sectorielle (S) et détaillée (D).

L'Autorité publique, elle, veut s'assurer que le futur quartier avec ses allotissements, bâtiments projetés et espaces publics réponde bien aux objectifs d'intérêt public fixés dans le plan directeur localisé et/ou le plan d'affectation. Entre autres, la mixité sociale et fonctionnelle, la part de logements abordables ou encore la minimisation des surfaces imperméables sont des aspects qui font l'objet d'une attention particulière. La Commune s'intéresse donc aux éléments qui ont une portée globale à l'échelle du quartier entier.

Le propriétaire foncier aime à savoir quelle est la plus-value foncière qu'il peut générer en faisant construire le plus possible de surface de plancher. Il est intéressé à obtenir des valeurs techniques (surfaces, volumes) et aux coûts préalables qui déterminent les taxes et rentes éventuelles qu'il peut toucher s'il cède ou loue son terrain.

Le développeur immobilier va plutôt s'intéresser au suivi et à la coordination du projet en gérant les aspects financiers, organisationnels et techniques dans leur globalité. Il a de l'intérêt à faire des simulations à l'échelle du quartier pour le compte des propriétaires fonciers et de l'Autorité publique mais aussi à un niveau plus détaillé pour répondre aux besoins des maîtres d'ouvrage. Par exemple, le coût des équipements publics intéresse l'Autorité et celui des équipements généraux est plutôt destiné aux propriétaires qui peuvent ensuite récupérer une partie de l'investissement en imposant une taxe aux MO. Les valeurs liées au potentiel à bâtir d'un allotissement et à la valeur du terrain peuvent aussi être estimées et utiles aux investisseurs. La gestion du phasage, en simulant quelles sont les étapes de construction du quartier selon les différentes contraintes et leurs délais, est aussi un grand intérêt de cet outil de simulation pour le développeur.

Le maître d'ouvrage s'intéresse au potentiel à bâtir de leur allotissement et à sa rentabilité. Un

outil de simulation leur permet de calculer et comparer plusieurs variantes avec des morphologies bâties (surfaces, hauteurs) et des aménagements extérieurs différents dans le but d'estimer les coûts de construction et surfaces nettes pour la vente. En sortant des indicateurs de surfaces, volumes et de coûts, l'outil donne la possibilité aux investisseurs de faire des projections financières pour l'entier de la durée de vie de l'ouvrage afin de réaliser la variante la plus rentable.

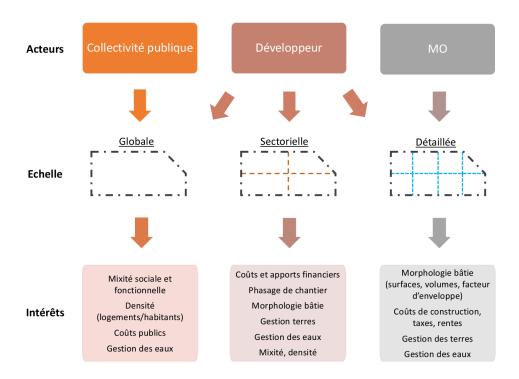


FIGURE 3.3 – Acteur visés, échelles de simulation et intérêts associés.

3.2.2 Indicateurs quantitatifs

Les indicateurs quantitatifs qui peuvent être générés par cet outil peuvent être classés en quatre catégories qui concernent la technique, le phasage, la finance, l'environnement/énergie et la mixité. Chacune de ces catégories contient des indicateurs ciblés qui peuvent intéresser différents acteurs et être simulés aux échelles prédéfinies (cf. Figure 3.4).

3.2.3 Utilisation d'une interface SIG

Sur le principe, le calcul de la plupart des ces indicateurs n'est pas complexe et peut très bien être fait dans un tableur. Cependant, l'utilisation d'une maquette SIG comme base pour lancer des simulations de développement amène une vraie plus-value car elle permet de tenir compte de la composante géographique des données. Une contrainte, par exemple, n'a pas forcément un impact pour l'entier du périmètre de développement si on tient compte de son emprise réelle sur le site concerné. Dans un SIG, chaque donnée de base a une géométrie et des informations attributaires qui permettent par la suite d'effectuer des calculs. Avant de monter la maquette, une modélisation orientée objet de ces données permet d'assigner des relations spatiales entre les entités à l'aide d'identifiants univoques. Ainsi, on peut facilement savoir quel bâtiment appartient à quel périmètre qui est

Catégorie	Acteurs visés	Échelle
Technique:		
Droits à bâtir, indices de densité	Autorité, Propriétaire, Développeur, MO	G, S, D
Surfaces plancher	Propriétaire, Développeur, MO	G, S, D
Volumes bâti	MO	D
Phasage:		
Dates projet	Propriétaire, MO	D
Dates chantier	Autorité, Développeur, Propriétaire, MO	G, S, D
Finances:		
Coûts travaux préparatoires	Autorité, Développeur	G, S
Coûts équipements	Autorité, Développeur	G, S
Coûts construction	MO	D
Taxes, rentes	Autorité, Propriétaire	G, S, D
Environnement/Energie :		
Coefficient de forme	Autorité, Développeur, MO	D
perméabilité des sols	Autorité, Développeur, MO	G, S, D
Gestion des terres	Développeur, MO	G, S, D
Mixité:		
Types logements	Autorité, Développeur	G, S
Types activités	Autorité, Développeur	G, S
Nombre habitants/logements	Autorité, Développeur	G, S

TABLEAU 3.4 – Catégories d'indicateurs, acteurs visés et échelle de simulation.

impacté par quelles contraintes. Puis on lance une simulation avec calcul d'indicateurs sur ce périmètre, par exemple un lot, en se basant sur ses propres attributs et ceux des entités dont il est lié spatialement.

Tous les éléments de base composant le projet de développement immobilier peuvent ainsi avoir une emprise physique sur une carte. Cela permet de bien visualiser où se trouvent les contraintes les plus impactantes et ainsi définir les usages des sols, les pièces urbaines ou encore les accès principaux afin d'optimiser au mieux l'organisation du futur chantier en terme de phasage. De plus, le calcul des coûts pour les travaux préparatoires, équipements ou encore bâtiments est grandement facilité car les dimensions, surfaces et valeurs référentielles nécessaires à ces calculs sont automatiquement repris de la géométrie et attributs des objets présents dans la carte.

En parallèle de la maquette SIG, une programmation directement rattachée à celle-ci récupère les géométries et attributs de chaque entité de base stockée dans une base de données et affichée sur la carte. L'outil programmatique peut ainsi faire des calculs sur ces données à l'aide de traitements géographiques comme des intersections ou inclusions spatiales entre deux objets (p. ex. pour savoir quelles contraintes impactent un lot). En sortie, il peut ainsi fournir des indicateurs quantitatifs sur un périmètre d'étude à une certaine échelle (p. ex. un lot) et les stocker dans une nouvelle base de

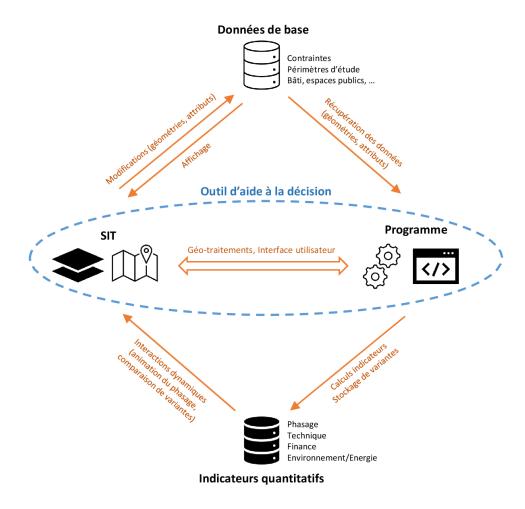


FIGURE 3.4 – Architecture de l'outil et apports de l'interface SIG.

données des résultats. Un grand avantage de cette méthode de gestion des données est de pouvoir laisser la possibilité à l'utilisateur de faire des modifications sur les données de bases au travers de l'interface SIG. Typiquement, il peut modifier la géométrie d'un objet et ses valeurs attributaires et ainsi relancer un calcul. Cela dans le but de pouvoir lancer plusieurs variantes qui sont stockées dans la base de données en sortie avec, pour chaque périmètre d'étude analysé, un numéro de variante et des indicateurs calculés selon les différentes catégories définies au préalable. Ce procédé donne la possibilité de revenir sur des variantes précédemment calculées dans le but de les comparer avec la variante en cours.

Au final, ce système permet à l'outil de générer différents rendus comme la génération d'un rapport PDF présentant les indicateurs calculés pour une variante. Il est aussi possible de gérer les coûts à l'aide de rendus graphique de types cash flows avec distinction des recettes et dépenses. Le calcul du phasage de chantier est automatisé en se basant soit sur les délais des contraintes soit sur des dates de chantier souhaitées par le développeur et donc entrées à l'avance. Pour chaque périmètre calculé à l'échelle sectorielle ou détaillé (cf. Figure 3.3), des dates de début et fin de travaux peuvent être calculées par variante. Bien sûr, grâce à l'interface SIG, les délais des contraintes peuvent être adaptés à tout moment selon les conditions et le phasage recalculé. De plus, grâce aux dates calculées aux échelles précitées, il est aussi possible de générer une animation temporelle du phasage en

affichant progressivement les lots et bâtiments associés en fonction de leurs dates sur la carte SIG. Un dernier aspect en matière de rendu est l'export d'un paquet de données formatées qui sont utiles pour des calculs de consommation énergétique à l'aide d'outil comme SméO. Cela offre une vraie complémentarité entre ce simulateur de développement immobilier et des aspects de certification énergétique et de durabilité.

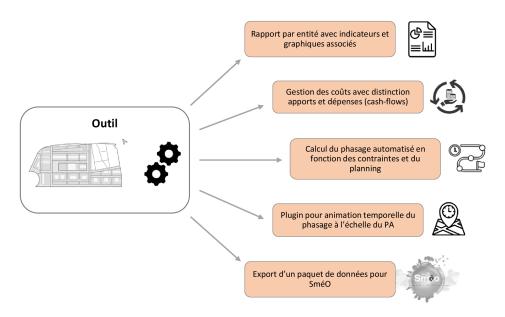


FIGURE 3.5 - Types de rendus pouvant être générés par l'outil.

3.3 Entités de référence pour les simulations

Au-delà des contraintes déjà citées, tout développement immobilier est composé de différentes entités spatiales sur lesquelles il est possible de faire des simulations quantitatives à différentes échelles (cf. Figure 3.3). Il a fallu définir une structure de ces données de base selon une hiérarchie allant de l'échelle globale à détaillée. Au final, trois entités de référence ont été définies dans le but de pouvoir en calculer plusieurs variantes et de pouvoir comparer les résultats.

3.3.1 Lots

Le lot ou l'allotissement est l'entité la plus petite sur laquelle il est possible de générer des résultats. Il s'agit d'un périmètre d'implantation, en quelque sorte, sur lequel il est prévu de construire un ou plusieurs bâtiments. Ces périmètres sont généralement définis au stade de l'élaboration du plan d'affectation qui fixe des périmètres pouvant accueillir des constructions. Ensuite, il y a une structure foncière comme un DDP qui vient s'y rattacher et qui permet au propriétaire foncier de louer cette portion de terrain à un investisseur qui va la bâtir. Ce dernier prend à partir de là le rôle de MO et peut ainsi utiliser cet outil d'aide à la décision pour simuler différentes morphologies bâties et d'aménagements sur son lot en apportant lui-même des modifications à la maquette SIG. Il obtient ainsi toute une série d'indicateurs par variante et peut ainsi évaluer quelle est la plus coûteuse ou la plus rentable.

Bâtiments Les bâtiments sont une sous-entité appartenant aux lots. Ce sont donc les futures constructions dont la forme et la hauteur sont totalement adaptables via la maquette SIG tout en respectant, bien sûr, la réglementation en vigueur en matière de densité et d'esthétique des constructions. On peut notamment changer le nombre de niveaux, le matériau d'ossature, la géométrie ou encore si un sous-sol est prévu ou non. Il peut y'avoir un ou plusieurs bâtiments par lot accolés ou non.

Aménagements extérieurs Les aménagements extérieurs sont les espaces de dégagements autour ou entre les bâtiments qui permettent soit le délassement soit le déplacement. Il y a donc deux types principaux d'aménagements que sont les surfaces vertes comme les jardins ou parcs et les surfaces dures comme les accès ou places.

3.3.2 Zones de développement

La zone de développement est une entité intermédiaire qui permet de faire des simulations à une échelle sectorielle principalement à destination du développeur immobilier. Il s'agit d'un réseau de surfaces étanches, c'est à dire sans trous ni superpositions entre elles, qui a pour but de définir les grandes étapes de phasage du chantier. En effet, ces zones sont intersectées par les contraintes dont le délai le plus contraignant est attribué à la date de début des travaux la plus rapide pour la zone de développement concernée. Ces entités peuvent ainsi contenir tant des espaces privés (lots avec leurs bâtiments et aménagements) que publics.

Espaces publics A l'intérieur d'une zone de développement, on retrouve des espaces publics qui lui sont directement rattachés. Différents types d'espaces publics ont été définis comme les parcs publics, places publiques, accès (routes, chemins ou allées), parkings et bandes végétalisées. Le simulateur permet de comptabiliser les surfaces selon le type d'espace public et d'en quantifier le montant. Le financement des espaces à usage du grand public comme les parcs et places sont à la charge de l'Autorité publique et le reste des espaces (accès, parking et bandes végétalisées) sont financés à moyen terme par les MO des différents lots en payant la taxe d'équipements perçue par la Commune lors de l'octroi du permis de construire.

Réseaux Les réseaux sont également liés aux zones de développement car il s'agit des canalisations acheminant les services de bases aux différents lots et bâtiments. On parle ici des fournitures en eau potable, électricité, chauffage, télécommunication ainsi que de l'évacuation des eaux claires et usées. Le principal but est de pouvoir simuler les coûts engendrés pour la pose de ces réseaux et comment se répartissent les frais entre les acteurs.

3.3.3 Périmètre du plan d'affectation

Il s'agit ici de l'entité la plus grande qui permet de faire des simulations à l'échelle globale tant pour le développeur que pour l'Autorité publique. Le périmètre général du plan d'affectation est utilisé pour cela car il représente finalement l'emprise totale du développement immobilier. Il contient donc toutes les zones de développement avec leurs espaces publics et réseaux ainsi que tous les lots

avec leurs bâtiments et aménagements. Faire des simulations sur cette entité permet d'avoir une vision d'ensemble des coûts, du phasage ainsi que des aspects techniques, environnementaux et sociaux.

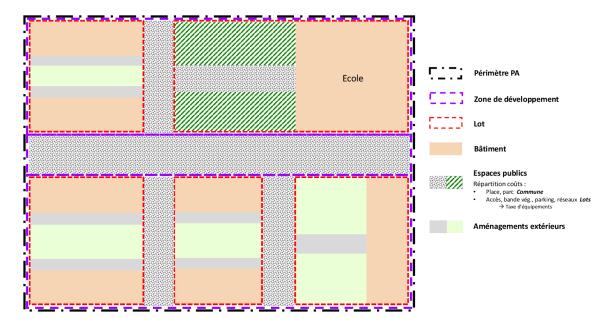


FIGURE 3.6 - Structure des données de bases.

3.4 Modélisation des données

Une fois la structure des données posée, il est maintenant nécessaire d'en faire une modélisation spatiale qui permet ensuite de monter la maquette SIG. Cette modélisation se veut orientée objet car elle est composée de plusieurs tables (couches de données) qui ont leur structure propre et peuvent interagir entre elles. Autrement dit, chaque couche de données a ses géométries, ses attributs qui définissent les objets la composant et des relations avec d'autres couches. Par exemple, la couche bâtiments est composée de plusieurs entités qui ont chacune une forme physique sur le terrain (géométrie), des informations comme le nombre de niveaux ou le matériau d'ossature (attributs) et un lien avec la couche des lots car chaque bâtiment est relié à un lot précis (relations). Cette structure permet ainsi de faire des simulations pour un lot, par exemple, dans lesquelles les calculs tiennent compte des données du lot en question mais aussi de celles des bâtiments et aménagements qui lui sont rattachés.

3.4.1 Modèle des données de base

Le modèle créé pour ce projet est basé sur le langage UML qui est une référence pour la programmation orientée objet. L'UML permet de représenter la structure des données sous une forme schématisée qui représente les différentes tables de données, leurs attributs et les relations entre les tables. Chaque table peut contenir plusieurs attributs de différents formats (nombre entier, nombre réel, texte, liste à choix, etc.) qu'il faut définir au préalable. Puis, ceux-ci peuvent être définis comme devant être renseignés obligatoirement ou non. Chaque table a ensuite des relations avec une ou

plusieurs autres tables qui définissent la hiérarchie entre les entités (objets) des différentes tables et combien d'entités - sont contenues dans - appartiennent à - une autre entité.

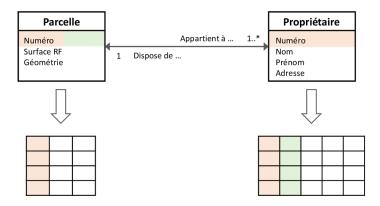


FIGURE 3.7 – Passage du format UML à une base de données.

Lorsque l'on passe de cette modélisation UML à une base de données physique, les relations entre tables sont implémentées par des attributs supplémentaires qui font le lien avec les autres tables. Ainsi, chaque entité d'une table est identifiée par un identifiant unique (clé primaire) et un autre identifiant externe (clé étrangère) qui permet de faire le lien avec l'entité d'une autre table et qui correspond en réalité à la clé primaire de cette deuxième entité. Dans l'exemple (cf. Figure 3.7), les associations du modèle UML définissent qu'une parcelle peut appartenir à un ou plusieurs propriétaires et qu'un propriétaire peut disposer d'une seule parcelle (pour ce modèle-ci). Si on traduit cela en base de données, chaque parcelle de la table du même nom est définie par un identifiant unique qui correspond à l'attribut "numéro". Puis, dans la table propriétaire, chacune des entrées a également un identifiant ainsi que le numéro de parcelle associé dans la deuxième colonne.

Dans le cadre du modèle pour cet outil d'aide à la décision (cf. Figure 3.8), on retrouve au sommet de la hiérarchie le périmètre du plan d'affectation qui contient toutes les autres tables et leurs entités. Puis, en-dessous, les zones de développement qui sont impactées par des contraintes et composées d'espaces publics et de réseaux. Enfin, les lots sont contenus dans ces zones de développement et, eux-mêmes, contiennent des bâtiments et des aménagements extérieurs. Chacune de ces tables a une liste d'attributs qui lui est propre et qui doivent être renseignés au préalable afin de pouvoir faire des simulations avec calculs d'indicateurs. Le modèle a été conçu avec le logiciel UML Editor et a pu ensuite être transformé en une base de données au format PostGIS qui permet d'interagir avec une interface SIG par la suite. Pour cette transformation, il a fallu passer du format UML à un format d'échange standardisé, tel que l'INTERLIS 2 basé sur du langage XML, puis utiliser "Model Baker" qui est un plugin QGIS permettant de générer une base de données PostGIS entre autres.

3.4.2 Stockage des résultats et gestion de variantes

Une fois les données modélisées, il faut maintenant mettre en place un système permettant de pouvoir générer plusieurs simulations sur une entité comme un lot, par exemple, puis avoir la possibilité de comparer ces résultats. La solution mise en place consiste à stocker les résultats calculés par l'outil dans une nouvelle base de données PostgreSQL (qui n'a pas de géométries) contenant les

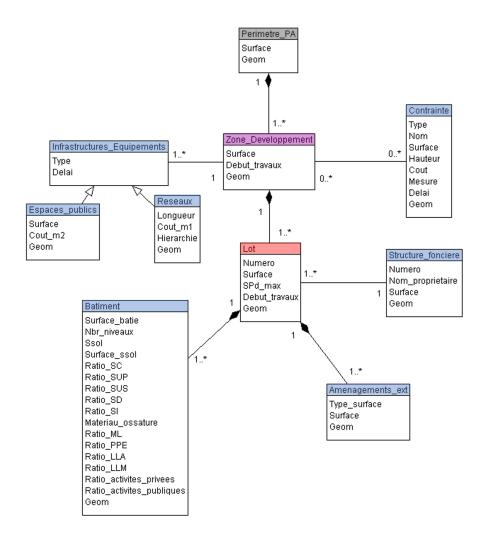


FIGURE 3.8 - Modèle utilisé pour monter la base de données.

variantes par entité. Celle-ci est donc composée de quatre tables contenant chacune les indicateurs calculés pour les bâtiments, les lots, les zones de développement ou le périmètre du PA. Chaque variante générée est définie par un numéro d'identifiant entré par l'utilisateur ainsi que par le numéro de l'entité sélectionnée.

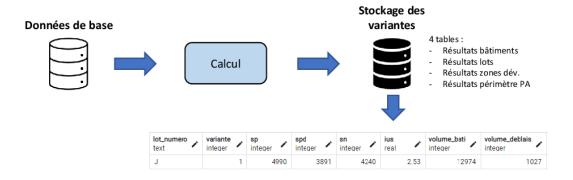


FIGURE 3.9 – Système de stockage des variantes.

4 Développement d'une maquette SIG sur le projet des Prés-de-Vidy

Dans le cadre de ce travail, l'outil d'aide à la décision est développé et testé sur un futur écoquartier lausannois. D'entente avec le bureau de développement et projet Métamorphose (BDM) de la Ville de Lausanne, le site des Prés-de-Vidy a été choisi.

4.1 Le projet des Prés-de-Vidy

Le futur écoquartier des Prés-de-Vidy fait partie du projet "Métamorphose" de la Ville de Lausanne ayant pour objectif d'accueillir 16'000 nouveaux habitants et emplois répartis sur deux sites : Les Plaines-du-Loup et les Prés-de-Vidy. Une application concrète de l'outil d'aide à la décision développé dans le cadre de ce travail se fait sur ce périmètre.

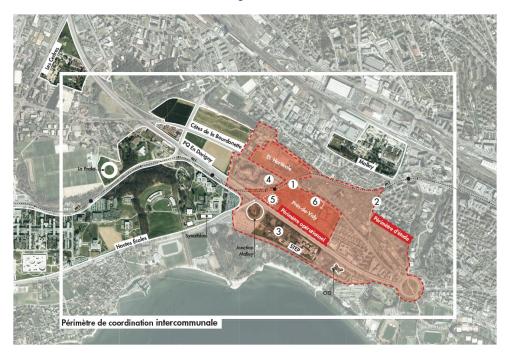


FIGURE 4.1 – Situation générale des Prés-de-Vidy (VILLE DE LAUSANNE - BDM, 2018).

Le site des Prés-de-Vidy est idéalement situé en marge de la Ville et le long de deux axes de transports principaux que sont le M1 et l'autoroute A1. Il se situe également à proximité des hautes écoles (UNIL/EPFL), du CIO, des rives du lac ainsi que de la gare CFF de Malley ce qui offre de bonnes possibilités pour des liaisons de mobilité douce. 3'500 habitants et emplois sont prévus sur ce secteur et celui de l'établissement horticole (cf. figure 4.1).

4.1.1 Contexte

Le site est actuellement composé de quelques villas datant des années 1930, d'un garage et du centre administratif de Lausanne-Vidy (CALV) abritant plusieurs entreprises. Ces bâtiments se situent majoritairement le long de l'Avenue du Chablais et de la Route de Chavannes. Le reste du site est libre de constructions. Plusieurs autres projets de développement sont en cours ou prévus autour des Prés-de-Vidy comme les futurs quartiers de Malley-Gare et Malley-Gazomètre ainsi que les secteurs "En Dorigny" et des "Côtes de la Bourdonnette" qui prévoient également plusieurs centaines

de logements combinés à des activités commerciales et administratives. La STEP qui se trouve au sud de l'autoroute doit être recouverte notamment dans le but de réduire les émissions odorantes. (VILLE DE LAUSANNE - BDM, 2018).

Du point de vue de la mobilité, le secteur des Prés-de-Vidy est bien évidemment stratégique car d'ores et déjà desservi par des axes importants à savoir l'autoroute, le métro M1 et le réseau de bus. Cependant, la mobilité douce y est presque inexistante, le terrain étant enclavé entre des voies de communication. Il y a donc un intérêt important à développer des liaisons avec les secteurs avoisinants comme la Bourdonnette, le cimetière du Bois-de-Vaux, le Parc Bourget au bord du Léman ou encore le CIO et les Hautes Écoles. Pour en revenir au réseau routier, il faut souligner qu'une nouvelle bretelle autoroutière est prévue à l'angle sud-ouest du site des Prés-de-Vidy. Néanmoins, celle-ci devrait avoir peu d'impact sur la planification du projet car elle a été volontairement sortie du périmètre de développement immobilier et ne fait ainsi pas partie du plan d'affectation à venir. D'autre part, une augmentation de la capacité des transports publics est nécessaire au vu des 3'500 habitants et emplois prévus dans la zone entre les Prés-de-Vidy et le site de l'établissement horticole. Pour ce faire, il est prévu d'ajouter une nouvelle voie au M1 pour augmenter les cadences et de rajouter et prolonger quelques lignes de bus (VILLE DE LAUSANNE - BDM, 2018).

4.1.2 Situation foncière

La majorité des parcelles que composent le site sont propriétés de la Ville de Lausanne. Il y a le secteur du CALV, à l'est, dont les sept parcelles sont privées. Cinq d'entre elles contiennent des bâtiments avec des bureaux, restent privées et les bâtiments ne seront pas démolis mais pourront être transformés et agrandis. Une parcelle avec un immeuble locatif est prévue d'être rachetée par la Ville et le bâtiment sera démoli et reconstruit pour s'adapter à la morphologie bâtie du futur quartier. Des négociations avec le propriétaire concerné sont en cours afin d'aboutir sur un accord dans lequel il est indemnisé financièrement ou en nature (récupération de droits à bâtir dans le futur quartier). La dernière parcelle contient essentiellement des aménagements (route d'accès, parc) ainsi qu'un parking souterrain. Les parties sud et ouest de celle-ci sont nécessaires au développement futur avec notamment la route d'accès au quartier et la construction de logements en lieu et place de l'actuel parking souterrain. Là aussi des négociations ont été engagées et il est convenu que les droits à bâtir des futurs allotissements prévus à l'emplacement du parking seront redistribués aux propriétaires du CALV.

4.1.3 Etat d'avancement

Un premier atelier d'experts a eu lieu en 2014 ayant pour objectifs de définir les enjeux de développement du site, identifier les problématiques et proposer des solutions en matière de mobilité, urbanisme ou d'environnement puis de constituer une base de travail pour établir le cahier des charges des mandats d'études parallèles (MEP) (VILLE DE LAUSANNE - BDM, 2014). Ces derniers débutent en 2017 avec la participation de quatre équipes composées de bureaux spécialisés en développement urbain (urbaniste, architecte, architecte paysagiste). Chaque équipe a dû réaliser un diagnostic à l'échelle du site puis établir un masterplan présentant une morphologie bâtie, des aménagements et

espaces publics, des infrastructures de mobilité ainsi qu'une proposition de phasage tenant compte des contraintes (VILLE DE LAUSANNE - BDM, 2017). Chacun des rendus a fait l'objet d'une démarche participative sous forme de table ronde où tout un chacun pouvait donner son avis et faire des propositions. Aucun mandat n'a été attribué à la suite de cette procédure mais un schéma directeur synthétisant les meilleures idées des participants a pu être dressé par le bureau de développement et projet Métamorphose (BDM) de la Ville. Il définit les lignes directrices pour ce qui est des usages du sol, des aménagements et de la mobilité qui permettront ensuite d'élaborer les plans d'affectation pour les sites des Prés-de-Vidy et de l'établissement horticole. Une nouvelle démarche participative a eu lieu en 2018 restituant au public l'ensemble des études réalisées jusqu'ici et la programmation imaginée par la Ville. Puis, en 2019, les études préliminaires ont été lancées avec les études d'impact sur l'environnement (EIE) et l'étude géotechnique.

A partir de 2021, une image directrice a été amorcée par le BDM en collaboration avec ses mandataires démontrant la faisabilité du schéma directeur. Elle définit la répartition des droits à bâtir entre logements, activités et infrastructures publiques, représente une morphologie urbaine en 3D, définit la structure des espaces publics et les accès aux bâtiments. Les axes principaux de mobilité douce et motorisée dans le futur quartier ainsi que les ambitions environnementales (perméabilité des sols, toitures végétalisées, énergie) y sont également présentés. En parallèle, les plans d'affectation (PA) pour les 2 sites de développement sont en cours d'élaboration par le service d'urbanisme de la Ville de Lausanne. Un bureau mandataire de la Ville a également fait une première proposition de définition d'allotissements et de répartition des surfaces de plancher par type de logements (PPE, ML, LLA, LLM) et type d'activité (artisanat, commerces, bureaux, équipements publics) selon le programme de mixité sociale et fonctionnelle propre à la Ville. Toutes ces démarches sont encore en cours aujour-d'hui.

4.2 Inventaire des contraintes du site

Un projet de développement immobilier est impacté par diverses contraintes qui peuvent avoir de grands impacts si elles ne sont pas anticipées dès la phase de planification. Les coûts engendrés peuvent être conséquents et doivent être pris en compte et annoncés le plus tôt possible pour éviter les imprévus. Le phasage de chantier peut aussi être passablement chamboulé selon les délais de certaines contraintes qui rendent le terrain impropre à la construction jusqu'à échéance. Avec l'exemple des Prés-de-Vidy, il est possible de mettre en évidence différents types de contraintes car le site est marqué par un contexte historique avec notamment la découverte d'une nécropole romaine, l'exploitation agricole, l'arrivée de l'autoroute et la construction de logements puis l'arrivée du centre administratif. Des données et géodonnées de base sont nécessaires pour pouvoir regrouper et modéliser l'ensemble de ces contraintes dans un environnement SIG qui permet ensuite de faire des simulations. Puis, chacune de ces contraintes a un ou des impacts concrets sur le développement immobilier aux Prés-de-Vidy qui sont identifiés.

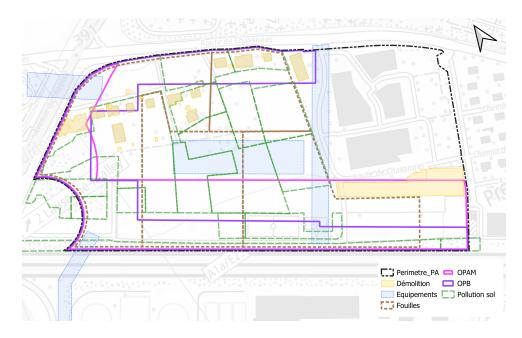


FIGURE 4.2 – Représentation des contraintes impactant le site des Prés-de-Vidy.

4.2.1 Fouilles archéologiques

Données Le site a un passé archéologique assez fort selon des sondages effectués entre 2008 et 2011 par le service d'archéologie cantonal. Selon un premier diagnostic, les parties nord, sud et est du site renferment principalement des ruines romaines avec notamment deux nécropoles dont une, au sud du CALV, pour laquelle les fouilles ont déjà débuté en 2013, des fossés ou encore des empierrements et des pieux. Les zones centrales et ouest sont composées de vestiges préhistoriques datant de la période mésolithique. L'objectif principal pour le Canton est de fouiller l'ensemble du site afin de faire un inventaire de l'ensemble des vestiges présents puis de les analyser et de les dater. Ceci permet d'avoir une sauvegarde de l'exploitation historique du site et de le replacer dans son contexte archéologique à l'échelle régionale (Section Archéologie Cantonale, 2018). Le service d'archéologie a établi un planning provisoire pour l'exécution des fouilles selon quatre secteurs définis. Ces derniers ont chacun un délai d'ici auquel les recherches doivent être finalisées et le terrain rendu à la Ville pour la construction. Une modélisation de la géométrie des ces secteurs a été effectuée (cf. figure 4.2) dans une base de données avec les délais correspondants en attributs.

Impact L'impact est donc principalement temporel dans le sens où il y a une influence sur le phasage de chantier pour le quartier. De façon indirecte il est aussi financier car c'est du terrain que la Commune ne peut pas valoriser tant que les fouilles ne sont pas terminées. Une participation aux frais pour l'évacuation et la mise en décharge des terres décapées est aussi à prendre en compte pour la Ville. Dans le cadre de ce travail, ces coûts sont comptés une seule fois lors de la dépollution des sols.

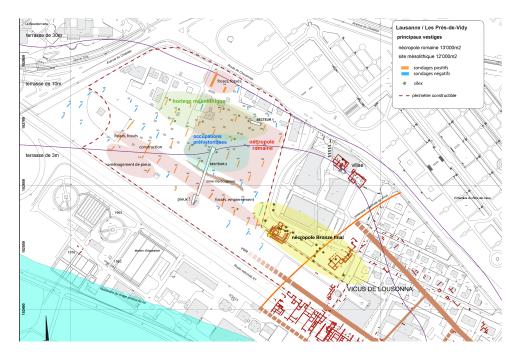


FIGURE 4.3 – Situation des fouilles et vestiges (SECTION ARCHÉOLOGIE CANTONALE, 2018).

4.2.2 Pollution des sols

Données Une analyse de la pollution des sols a été réalisée en été 2019 par le bureau Ecoscan SA sur mandat de la Ville de Lausanne. Une soixantaine de prélèvements ont été réalisés sur l'ensemble du site puis analysés selon l'OSol et l'OLED en fonction de la nature du terrain (naturel ou remanié). Pour les sols naturels, il en ressort qu'une grande partie dépassent largement les valeurs limites et sont considérés comme très pollués selon l'OSol. Les terrains les plus pollués se situent dans la partie centrale du périmètre où l'on retrouve de fortes concentrations en mercure et autres métaux lourds dues probablement à l'utilisation de fertilisants agricoles. Les sols naturels sont également étudiés, avec les sols remaniés, au sens de l'OLED de façon à définir si les matériaux terreux qui ne peuvent pas être revalorisés doivent être évacués en décharge de type B ou de type E. Les décharges de type B aussi appelées DCMI accueillent les matériaux dits inertes à savoir des terres d'excavation ou matériaux pierreux faiblement ou peu pollués. Les décharges de type E sont équipées pour stocker et traiter les terres et matériaux pollués. Toutes les terres qui ont été catégorisées comme non polluées pourront être revalorisées in-situ ou évacuées en décharge de type A (ECOSCAN SA, 2019).

L'étude d'Ecoscan SA a défini différents secteurs qui ont chacun un degré et une profondeur de pollution (entre 20 et 40cm) définissant si l'évacuation doit se faire en décharge de type A, B ou E. Tous ces périmètres ont été intégrés à la base de données par digitalisation (cf. figure 4.2) et les informations attributaires comme le type de décharge, la profondeur et le coût au m³ renseignées.

Impact Pour ce qui est de la pollution des sols, l'impact sur le développement immobilier est majoritairement financier. Comme mentionné, un coût au m³ a été défini prenant en compte l'excavation de la couche polluée, son transport et son stockage en décharge selon le degré de pollution. La dépollution des sols se fera en même temps que les fouilles archéologiques pour lesquelles cette couche de



FIGURE 4.4 – Filières d'évacuation des terres polluées selon l'OLED (ECOSCAN SA, 2019).

terre doit être ôtée. Les délais sont ainsi les mêmes que pour les fouilles. Ces travaux ont lieu en phase préparatoire avant travaux et les frais engendrés doivent ainsi être avancés par la Ville de Lausanne propriétaire des terrains. Les montants pourront être récupérés avec les différentes taxes et rente DDP perçues lors de l'octroi du permis de construire aux MO.

4.2.3 Démolition de bâtiments

Données Le site est actuellement composé de divers bâtiments existants avec un garage à l'ouest, des villas individuelles dans la partie nord, un immeuble locatif ainsi que des bâtiments administratifs à l'est. A l'exception de ces derniers, l'ensemble de ces ouvrages sont prévus d'être démolis pour laisser place au futur écoquartier. La géométrie de ces bâtiments a pu être récupérée à partir des données cadastrales et intégrée à la base de données (cf. figure 4.2) avec des attributs comme la hauteur moyenne et le coût au m³ pour la démolition et l'évacuation.

Impact La démolition des bâtiments existants a un coût qui dépend du volume du bâtiment et qui comprend la main d'oeuvre pour la démolition, le transport des matériaux et la taxe de mise en décharge de type B. Comme pour les pollutions de sols, ces frais sont avancés par la Commune, propriétaire des terrains, qui obtiendra un retour sur investissement à moyen terme avec les taxes et rente DDP perçues. L'impact peut aussi être temporel dans le sens où rien ne peut se construire dans ces secteurs tant que les bâtiments ne sont pas démolis. Ce travail se fera certainement en parallèle des dépollutions de sols et fouilles archéologiques.

4.2.4 OPAM et OPB

Données Les ordonnances fédérales pour la protection contre les accidents majeurs (OPAM) et contre le bruit (OPB) définissent des mesures de protection pour limiter les nuisances aux futures constructions et leurs habitants. Pour ce qui est de la protection contre les accidents majeurs, principalement liés aux axes à fort trafic comme l'autoroute, elle impose des distances en deçà desquels il devient risqué de construire des logements où alors selon certaines conditions avec des mesures de protection. Concernant l'OPB, des valeurs limites sont définies tant pour les lieux d'émissions que d'immissions des nuisances afin de protéger au maximum les futurs logements. Des distances par rapport aux axes routiers sont également fixées et accompagnées de diverses mesures constructives.

Impact Le site des Prés-de-Vidy est entouré d'axes routiers à moyen et fort trafic comme l'autoroute A1 ou l'Avenue du Chablais. Les conséquences sur le développement immobilier sont avant tout techniques dans le sens où des règles constructives doivent être prisent pour répondre aux exigences des ordonnances fédérales. Par exemple, les bâtiments érigés en deçà de la distance fixée par l'OPAM doivent être composés d'un matériau de façade ignifuge. L'OPB, elle, préconise de ne pas mettre de locaux à usage sensible au bruit (chambres, pièces à vivre, balcons) aux fronts des axes routiers et d'y limiter les ouvertures en façades. Le futur quartier augmentant également la charge de trafic sur les routes, des mesures doivent également être étudiées pour limiter les nuisances à la source comme la pose d'un revêtement phono-absorbant ou en réduisant la vitesse maximale autorisée.

4.2.5 Equipmeents publics

Données Différents équipements ou infrastructures publics majeurs sont prévus pour le site pour répondre à des enjeux de mobilité principalement. Pour les Prés-de-Vidy, il s'agit notamment de l'accès routier principal au futur quartier et accessoirement au chantier, du futur parking véhicules pour les habitants, de la passerelle piétonne enjambant l'autoroute et permettant d'accéder au lac ainsi que du passage sous-voie menant à l'arrêt de métro de l'autre côté de l'Avenue du Chablais. Ces projets ont déjà des emprises provisoires définies par le BDM qui ont été utilisées pour les simulations.

Impact L'impact sur le développement immobilier dans ce cas est temporel car on ne peut pas construire autour tant que ces équipements ne sont pas réalisés. Chaque emprise modélisée se voit donc attribuer une date d'échéance pour la réalisation de l'équipement en question qui a une influence sur le phasage de chantier. Il y a également un aspect financier vu que les montants doivent être avancés par le propriétaire foncier ou l'Autorité s'agissant parfois d'équipements d'utilité publique à plus grande échelle en permettant des liaisons de mobilité douce notamment. Les frais d'infrastructures propres au quartier comme pour la route d'accès ou le parking sont eux rétrocédés par les taxes d'équipements lors de l'obtention des permis de construire par allotissement.

4.3 Montage de la maquette

4.3.1 Données à disposition et intégration dans la base de données

Les données de bases qui ont été récupérées pour ce travail sont multiples et de différents types et formats. Elles ont toutes fait l'objet d'un pré-traitement avec reformatage pour pouvoir être intégrées dans la base de données. Le logiciel FME a permis de lire les entités en entrée, peu importe leur format, attribuer à chacune un identifiant unique (clé primaire) et extraire leur géométrie pour l'encoder dans la base de données en sortie. Certaines clés étrangères à savoir le lien entre une entité et celle d'une autre table, ont aussi pu être attribuées à ce moment-là par le biais d'intersections spatiales entre les données. Ci-dessous, une liste des données de base utilisées, leur type, format et table de destination dans la base de données PostGIS. A noter que toutes les tables de données en sortie ont une géométrie de type surfacique 2D.

Nom et gestionnaire	Туре	Format	Table PostGIS
Plan d'affectation (Service de l'urbanisme) :			
Périmètre du PA	Surfacique 2D	DWG/DXF	Périmètre PA
Périmètres d'implantation	Surfacique 2D	DWG/DXF	Lots
Limites parcellaires futures	Surfacique 2D	DWG/DXF	Parcelles
Distance OPAM	Linéaire 2D	DWG/DXF	Contraintes
Emprise parking	Surfacique 2D	DWG/DXF	Équipements
SPd maximum	Texte	PDF	Lots
Données cadastrales (Service du cadastre) :			
Parcellaire existant	Surfacique 2D	DWG/DXF	Parcelles
Bâtiments existants	Surfacique 2D	DWG/DXF	Contraintes
Morphologie et typologie du bâti (BDM-AETC) :			
Bâtiments projetés	Surfacique 2D	DWG/DXF	Bâtiments
Nombre de niveaux	Texte	PDF	Bâtiments
Types logements / activités	Texte	PDF	Bâtiments
Données altimétriques (Swisstopo) :			
MNT terrain naturel	Raster	GeoTIFF	-
Hauteurs bâtiments (MNS)	Raster	GeoTIFF	Contraintes
Fouilles archéologiques (Etat de Vaud) :			
Secteurs de fouilles	Surfacique 2D	DWG/DXF	Contraintes
Dates d'échéance	Texte	PDF	Contraintes
Pollution des sols (Ecoscan SA) :			
Périmètres pollués	Surfacique 2D	DWG/DXF	Contraintes
Profondeur de pollution	Texte	PDF	Contraintes
Type de décharge	Texte	PDF	Contraintes

Tableau 4.1 – Données de bases, types, formats et tables de destination.

4.3.2 Ajout des données manquantes et renseignement des tables attributaires

Une fois la base de données remplies partiellement, elle a pu être ouverte par le logiciel SIG QGIS qui permet d'afficher les différentes tables et leurs géométries sur la carte. Puis, les données manquantes ont été ajoutées manuellement dans la base de données en les vectorisant via l'interface cartographique. Ces données sont notamment :

- Les zones de développement, grandes étapes de phasage définies en fonction des îlots bâtis et des accès principaux
- Les espaces publics (parc, place, accès, bande végétalisée) et réseaux
- Les aménagements extérieurs (surfaces dures et vertes)

Les attributs de base de ces données et ceux manquants pour les données déjà importées sont également renseignés dans QGIS. Ceux qui n'ont pas déjà été fournis par les données de base et qui doivent encore être renseignés sont énumérés ci-dessous par entité.

Bâtiment

- Ssol (oui/non) : Est-ce qu'un sous-sol est prévu pour ce bâtiment?
- Ratios de constructions : Pourcentage estimés pour la surface de construction SC (murs et cloisons), la surface utile principale SUP (parties habitables chauffées), la surface utile secondaire SUS (parties habitables non chauffées), la surface de dégagement SD (hall principal, cage d'escalier/ascenseur), et la surface d'installations SI (gaines techniques).
- Matériau d'ossature (bois ou béton).
- Ratios de mixité : Pourcentages prévus par type de logements (PPE, ML, LLA, LLM) et par type d'activités (publiques et privées).

Lot

- Date de début des travaux : Si on souhaite en imposer une et qu'elle ne soit pas définie par les contraintes.

Zone de développement

- Date de début des travaux si on souhaite en imposer une et qu'elle ne soit pas définie par les contraintes.
- Coût au m² selon le type d'espace public pour le calcul des coûts d'équipements.

4.3.3 Maquette SIG

Au final, on obtient une maquette complète du futur quartier reliée à une base données et cela sert de socle pour lancer des simulations à l'aide du programme qui est développé en parallèle. C'est ici que l'utilisateur peut lui-même modifier des géométries dans la carte ou des valeurs attributaires derrière les objets. Il sélectionne ensuite l'entité de base sur laquelle il veut effectuer un calcul (lot, zone développement ou périmètre PA) et lance une variante via l'interface utilisateur qui est présentée plus tard.

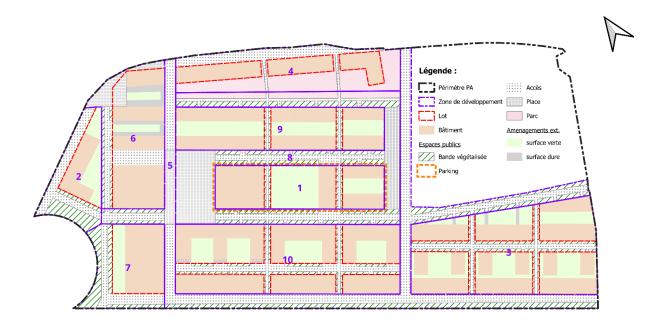


FIGURE 4.5 – Maquette SIG du quartier.

4.4 Indicateurs calculés

L'infrastructure technique étant posée, il faut alors définir les indicateurs que l'on souhaite calculer par entité. Ces indicateurs sont subdivisés en catégories (cf. Tableau 3.4) et ont chacun une méthode de calcul qui permet d'obtenir des résultats quantitatifs au plus proche de la réalité. Il n'est évidemment pas possible de les calculer avec exactitude sur la base de données en entrée qui ont été créées au stade de l'étude de projet.

4.4.1 Définitions

Chaque indicateur a dû être défini très clairement quant à son contenu et aux données nécessaires pour le calculer. Les tableaux ci-après listent l'ensemble des indicateurs par catégorie que l'outil peut fournir que ce soit sur un lot, une zone de développement ou le périmètre entier.

Nom	Définition	Données nécessaires
Dates enquête et	Dates estimées pour la mise à l'enquête et la dé-	Contraintes
permis de construire	livraison du permis de construire. Uniquement	
	calculés pour les lots.	
Dates début et fin de	Dates calculées au plus tôt pour le début des	Contraintes
travaux	travaux selon les contraintes intersectant l'en-	
	tité et leur délai.	
Date permis d'habiter	Date estimée pour la délivraison du permis	Contraintes
	d'habiter. Uniquement calculé pour les lots.	

TABLEAU 4.2 - Indicateurs de phasage, définitions et données nécessaires au calcul.

Nom	Définition	Données nécessaires
Surface plancher (SP)	Somme des surfaces de plancher brute (y com-	Surface bâtie,
	pris surfaces non-habitables).	Nombre niveaux
Surface plancher	Somme des surfaces de plancher déduites des	Ratios SC+SD+SUP,
déterminante (SPd)	SUS et SI.	SP
Surface nette (SN)	Somme des surfaces de plancher déduites des	Ratio SC, SP
	SC.	
IUS	Indice d'utilisation du sol	Surface terrain, SPd
Hauteur	Hauteur calculée pour le bâtiment en fonction	Nombre niveaux,
	de son matériau d'ossature.	matériau ossature
Volume bâti	Volume bâti brut total pour l'ensemble des bâ-	Surface bâtie,
	timents de l'entité.	hauteur
Volume	Volumes de terres à excaver et remblayer pour	MNT, emprises
déblais/remblais	les bâtiments.	bâtiments, s-sol?

Tableau 4.3 – Indicateurs techniques, définitions et données nécessaires au calcul.

Nom	Définition	Données nécessaires
Surface d'enveloppe	Somme des surfaces d'enveloppe des bâtiments	Dimensions
(Ath)	(façades, sol et toit).	bâtiments, Hauteur
Surface de réf.	Somme des surfaces de plancher chauffées, SPd	SPd
énergétique (AE)	par simplification.	
Facteur d'enveloppe	Facteur résultant du rapport entre Ath et AE.	Ath, AE
(Ath/AE) ²		
Terres à stocker	Volume de terres à stocker sur site pour les rem-	Emprises bâtiments,
	blais autour des bâtiments en fin de chantier.	MNT
Terres à évacuer	Volume de terres à évacuer et mettre en dé-	Emprises bâtiments,
	charge suite aux déblais pour les bâtiments.	MNT
Terre végétale	Volume de terre végétale à apporter en fin de	Surfaces vertes,
	chantier pour les aménagements extérieurs.	épaisseur substrat
Surface imperméable	Somme des surfaces dures considérées comme	Surfaces dures,
	imperméables et nécessitant une évacuation	bâtiments
	directe des eaux claires.	
Volume rétention EC	Estimation du volume d'eaux claires à retenir	Débits de sortie max.
	pour ne pas surcharger le réseau.	et proj., surface
		imper.
Surface toitures	Surface estimée de toitures végétalisées néces-	Volume rétention,
végétalisées	saires à la rétention du surplus d'eaux claires.	épaisseur du substrat

Tableau 4.4 – Indicateurs environ. et énergétiques, définitions et données nécessaires au calcul.

Nom	Définition	Données nécessaires
Coût démolition	Montant estimé pour la démolition des bâti-	Surfaces bâtiments,
	ments existants y compris transports et taxe de	hauteurs moyennes,
	mise en décharge.	CHF/m³
Coût dépollution	Montant estimé pour l'excavation, l'évacuation	Surfaces zones
	et la mise en décharge des terres polluées.	polluées, profondeur, CHF/m³
Coût espaces publics	Montant estimé pour l'aménagement des es-	Surfaces emprises,
	paces d'intérêt public au sens propre comme	CHF/m²
	les parcs et places.	
Coût équipements	Montant estimé pour les équipements collectifs	Surfaces, longueurs,
	propre au quartier comme les chemins d'accès,	CHF/m²
	bandes végétalisées, réseaux.	
Coût de construction	Montant estimé pour la réalisation des bâti-	Volume bâti, coût/m³
	ments.	
Coût des	Montant estimé pour l'aménagement des sur-	Surfaces, CHF/m ²
aménagements	faces dures et vertes privatives autour des bâti-	
D . DDD	ments.	op 1 1 6 1)
Rente DDP	Rente perçue par le propriétaire pour la loca-	SPd, valeurs foncières
	tion du terrain.	selon types de
m 114	m 114 - 146 - 119 - 1	logements
Taxe d'équipements	Taxe perçue par l'Autorité publique ou le pro-	Surfaces, CHF/m ²
	priétaire pour le pré-financement des espaces	
	publics et équipements de base.	0.041
Taxes permis	Taxes perçues par l'Autorité publique pour les	Coût de construction
	délivraison des permis de construire et d'habi-	
	ter.	

TABLEAU 4.5 – Indicateurs financiers, définitions et données nécessaires au calcul.

Nom	Définition	Données nécessaires
Répartition	Somme des parts en pourcent selon les diffé-	Ratios par bâtiment
logements	rents types de logements.	
Répartition activités	Somme des parts en pourcent entre les activités	Ratios par bâtiment
	publiques et privées.	
Nombre de	Nombres totaux estimés de logements et d'ha-	SPd pour logements,
logements	bitants sur l'entité sélectionnée.	surface moyenne
Nombre d'habitants	Nombre total d'habitants estimé.	Nombre logements

TABLEAU 4.6 – Indicateurs de mixité, définitions et données nécessaires au calcul.

4.4.2 Méthodes de calcul et choix techniques

Tous les indicateurs précités ont une méthode de calcul, une formule qui a été définie. De plus, afin de les estimer au mieux en se rapprochant le plus possible de la réalité, des choix techniques ou hypothèses de calcul ont été effectués. En effet, les données à disposition pour réaliser ces simulations correspondent à des intentions en phase de projet. Il existe donc un biais avec ce qui va réellement être réalisé à terme et les valeurs effectives de ces indicateurs après travaux. Par exemple, les coûts de construction, d'équipements ou encore d'aménagements sont estimés à l'aide de prix référentiels à l'unité définis pour des projets similaires par le catalogue des types d'ouvrages (CaTO). De même, les surfaces de plancher déterminantes ou surfaces nettes sont approximées grâce à des ratios définis par le MO entre 0.0 et 1.0 par surfaces de constructions (SC, SD, SI, SUP, SUS). Toutes ces hypothèses et méthodes de calculs sont listées par indicateur en annexe.

4.5 Programmation des fonctionnalités

En parallèle de l'interface cartographique avec QGIS, il y a toute une programmation développée en langage Python qui permet d'exécuter différentes tâches en se basant sur les données de base et leur géométrie. Le processus de développement technique ainsi que les principales fonctionnalités sont démontrés dans ce chapitre.

4.5.1 Démarche technique

La démarche technique globale pour la programmation de l'outil est présentée ci-après. Les données de bases sont affichées dans QGIS et récupérées par Python qui tient compte tant des attributs que des géométries. A partir de là, l'outil est divisé en cinq scripts exécutants autant de fonctionnalités qui consistent à : Récupérer les données et les stocker, calculer les indicateurs, générer un rapport pour l'entité sélectionnée, comparer les deux dernières variantes calculées et exporter un fichier XML avec certains indicateurs utiles pour des calculs de consommation énergétique avec SméO. Le tout est commandé par un script principal qui sert à imbriquer l'ensemble dans un plugin QGIS avec une interface utilisateur simple pour lancer les commandes. Une dernière fonctionnalité d'animation temporelle du phasage est directement implémentée dans ce plugin. Elle permet d'afficher une échelle de temps avec un curseur qui, lorsqu'il est déplacé, affiche les lots et zones de développement au fur et à mesure des dates de début et fin de chantier calculées.

Dans les sections suivantes, les six fonctionnalités de cet outil de simulation sont développées un peu plus en détail quant à leur fonctionnement et leurs interactions avec la base de données originale. Pour chaque script Python, les étapes de calculs sont présentées et illustrées par un schéma.

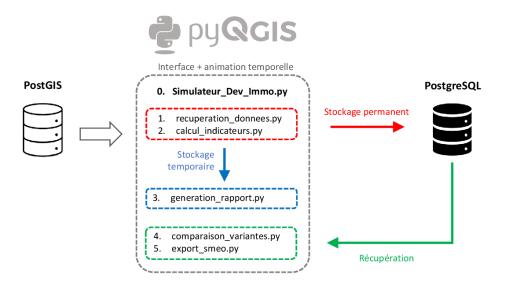


FIGURE 4.6 – Processus technique global de fonctionnement de l'outil.

4.5.2 Récupération des données de base

Ce premier script permet de récupérer les données (attributs et géométries) dans la base de données pour ensuite les stocker afin qu'elles puissent être récupérées et traitées dans les autres fonctions. Voici les grandes étapes de calcul :

- 1. Récupération de la couche active (nom de la table courante par ex. "zone de développement") et de la géométrie de l'entité sélectionnée sur laquelle on veut utiliser l'outil.
- 2. Identification des données de bases dans les autres tables (lots, contraintes, bâtiments, espaces publics, etc.) dont les géométries intersectent sont contenues dans l'emprise de l'entité en cours. Pour ce faire, des requêtes SQL sont exécutées afin de garder uniquement les données utiles pour la suite des traitements.
- 3. Stockage temporaire de ces données (attributs et géométries) dans des listes Python par type d'entité.
- 4. Instanciation d'une nouvelle base de données qui sera utilisée pour le stockage des indicateurs par variante et entité. A nouveau, des requêtes SQL permettent de créer la base de données ainsi que les tables qui la composent et leurs attributs, en l'occurrence une table par entité de simulation (par ex. nommée "résultats zonedev") avec autant d'attributs que d'indicateurs à calculer.

4.5.3 Calcul des indicateurs

C'est ici que l'ensemble des indicateurs sont calculés selon les méthodes de calcul définies au préalable.

- 1. Récupération des listes de données en relation avec l'entité sélectionnée qui ont été renvoyées par le premier script.
- 2. Définition de fonctions Python permettant de quantifier chacun des indicateurs en appliquant

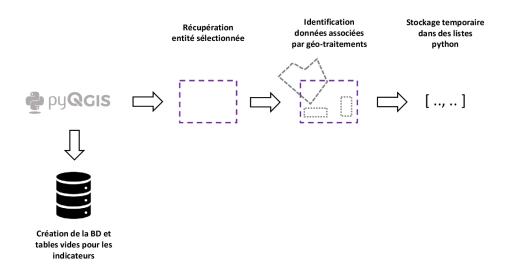


FIGURE 4.7 – Récupération des données de base.

la méthode de calcul et en utilisant les attributs et géométries des données récupérées en amont.

- 3. Exécution des fonctions et affichage d'une boîte de dialogue permettant à l'utilisateur d'attribuer un numéro de variante à son calcul sur l'entité en cours.
- 4. Stockage temporaire des résultats dans des listes et variables Python qui peuvent être récupérées pour générer le rapport sur la variante en cours. Stockage permanent de la variante et de ses résultats dans la base de données résultante pour pouvoir y revenir plus tard et comparer des variantes.

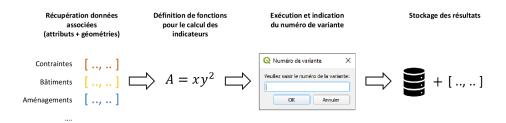


FIGURE 4.8 - Calcul des indicateurs.

4.5.4 Génération d'un rapport

Il s'agit du premier script permettant de générer un rendu visuel pour la variante simulée. Ici, c'est un rapport PDF présentant l'entité sélectionnée avec ses indicateurs par catégorie et quelques graphiques et diagrammes. La nature de ces derniers dépend de l'entité faisant l'objet du calcul. Pour un lot, il y a un diagramme de Gantt avec le planning de la mise à l'enquête au permis d'habiter. Pour les zones de développement, un graphique représentant les coûts et recettes ³ (cash flows) ainsi qu'un diagramme circulaire avec la répartition en matière de mixité sociale et fonctionnelle. Pour

^{3.} Si on se place du point de vue de l'Autorité publique avec les différentes taxes perçues ou du propriétaire foncier avec la rente DDP

pouvoir sortir ces rapports des gabarits de mise en page avec des titres pré-définis ont dû être rédigés en format LaTeX qui est un langage permettant de faire le lien entre la programmation et la rédaction de documents. Les étapes principales du script sont :

- Récupération des variables contenant les indicateurs. Chargement des gabarits LaTeX prédéfinis.
- 2. Insertion des indicateurs sous forme de tableaux par catégorie en-dessous des titres présents dans la mise en page initiale. Les tableaux sont décrits en LaTeX avec les variables Python contenant les valeurs qui viennent s'y intercaler. Création des graphiques et diagrammes également décrits en LaTeX et agrémentés des indicateurs y relatifs.
- 3. Enregistrement des gabarits LaTeX complétés en les renommant avec une nomenclature reprenant le numéro de l'entité sélectionnée et le numéro de sa variante. Génération du PDF en exécutant la commande "pdflatex" propre à LaTeX.

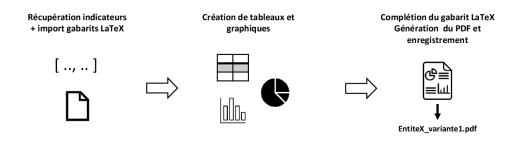


FIGURE 4.9 – Processus pour la génération d'un rapport par entité.

4.5.5 Comparaison de variantes

Ici il est question de comparer visuellement et directement les deux dernières variantes générées pour une même entité ou même pour deux entités distinctes. L'idée est de pouvoir ouvrir une fenêtre dynamiquement, sans avoir à enregistrer un PDF, qui puisse afficher côte à côte les graphiques et tableaux résumant les résultats pour deux variantes. Un tableau contenant les différences numériques entre les deux variantes est aussi généré par catégorie d'indicateurs. Si on contextualise la situation, l'utilisateur a bien sûr déjà calculé une première variante sur une entité et réalise des modifications dans l'interface cartographique tant au niveau des attributs que sur les géométries des données de base. Puis il lance une deuxième variante et peut à ce moment-là afficher une comparaison.

- 1. Connexion à la base de données des résultats et récupération des indicateurs pour l'entité sélectionnée qui sont stockés dans des listes Python.
- 2. Génération et affichage des tableaux et graphiques cette fois-ci directement en Python avec une librairie qui s'appelle "Matplotlib". Cela permet d'ouvrir une fenêtre temporaire avec ces éléments sans avoir à enregistrer de fichier.

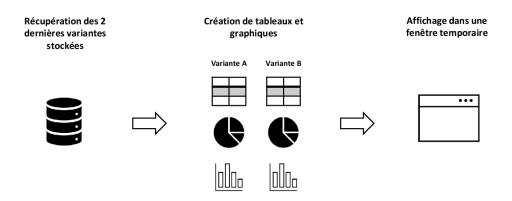


FIGURE 4.10 – Processus pour la comparaison de variantes.

4.5.6 Export de données pour SméO

Cette fonction permet d'exporter certains indicateurs dans un format interopérable tel que l'XML afin qu'il puisse facilement être récupéré par un autre outil existant comme SméO pour des calculs de consommation énergétique. Pour cela, il a fallu définir un fichier modèle pour l'export en format XSD qui définit déjà une arborescence avec des balises portant les noms des indicateurs à exporter du simulateur et leur formatage.

- 1. Connexion à la base de données des résultats et récupération des indicateurs pour l'entité sélectionnée qui sont stockés dans des listes Python.
- 2. Structuration de l'arborescence XML avec la librairie Python "xml.etree" en insérant les bons indicateurs sous les bonnes balises.
- 3. Enregistrement du fichier XML avec le nom et le numéro de l'entité simulée ainsi que le numéro de sa variante.
- 4. Contrôle de la validité du fichier en sortie avec le modèle XSD pré-défini.

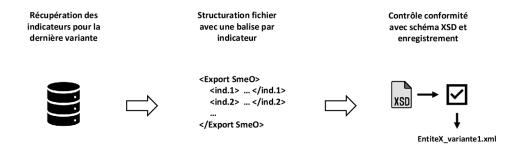


FIGURE 4.11 - Processus d'export de données pour SméO.

4.5.7 Plugin et interface utilisateur

Toutes les fonctionnalités précitées sont exécutées par un seul script qui définit l'interface utilisateur dans un plugin QGIS. C'est-à-dire que cela fait apparaître une nouvelle boîte à outils dans le logiciel SIG qui, lorsqu'elle est ouverte, affiche une fenêtre avec cinq boutons. Chacun des ces boutons permet d'exécuter une fonctionnalité en lançant le script concerné.

Dans ce dernier script est également implémenté une autre fonctionnalité qui permet une animation temporelle du phasage. Elle est décrite dans le même code car est directement liée avec une interface utilisateur. En effet, cela nécessite d'afficher un outil supplémentaire qui est un curseur temporel permettant de faire défiler les années. Au final, si une simulation est lancée sur le périmètre du PA, les dates de début et fin de travaux sont calculées pour l'ensemble des lots et zones de développement puis stockés dans une variante selon la fonctionnalité prévue à cet effet. Ces dates peuvent ensuite être ré-utilisées dans cette animation temporelle pour afficher les lots et zones de développement au fur et à mesure de leur phase chantier.



FIGURE 4.12 – Interface utilisateur.

4.6 Scénarios de simulation

Afin de démontrer encore plus précisément l'intérêt qu'ont les acteurs visés par cet outil à l'utiliser, des scénarios concrets de simulations sont présentés ci-après pour chacun d'eux.

A. Du point de vue de l'Autorité publique L'Autorité publique effectue des simulations à l'échelle globale afin de voir si le projet dans son ensemble répond aux objectifs fixés. Elle peut ainsi influer sur la répartition des types de logements et des activités principalement publiques comme les écoles, les équipements sportifs ou les crèches. Pour cela, elle va modifier les ratios de mixité dans les bâtiments afin d'atteindre les quotas définis pour les LLA, LLM et activités publiques sur l'ensemble du périmètre PA. Les indicateurs de densité comme l'IUS, le nombre d'habitants et de logements intéresse aussi l'Autorité et permettent, à l'échelle du quartier entier, de vérifier si les valeurs annoncées dans le schéma directeur sont atteintes. Les espaces publics étant financés ou pré-financés par la Commune, la maquette est également utile pour effectuer des variantes d'aménagement de ces espaces et en comparer les coûts engendrés. Lorsque l'Autorité est également propriétaire foncière, comme c'est le cas aux Prés-de-Vidy, les dépenses liées à la dépollution des sols et la démolition des bâtiments

existants lui incombent également et sont chiffrés sur l'entier du périmètre.

Proposition de modifications concrètes :

- 1. Modifier la géométrie d'un lot pour agrandir une place publique. Éventuellement, adaptation de la SPd maximale autorisée dans les attributs si PA pas encore en vigueur.
- 2. Modifier la géométrie de quelques bâtiments ainsi que le nombre de niveaux pour simuler la densité globale.
- 3. Adapter les ratios de mixités.
- 4. Apporter des modifications sur la répartition des espaces publics ainsi que leur coût au m² selon le type d'aménagement.
- **B. Du point de vue du développeur immobilier** Le développeur lui a le rôle de coordinateur en gérant le suivi et le phasage à différentes échelles. Étant en relation avec l'Autorité publique et des bureaux techniques, il gère les contraintes et leur délai afin d'obtenir la spatio-temporalité du futur chantier. Il va surtout effectuer des simulations sur le périmètre entier ou sur des zones de développement.

Proposition de modifications concrètes :

- 1. Modifier les délais de certaines contraintes en fonction de l'évolution du projet. Par exemple, les fouilles archéologiques se terminent deux ans plus tôt ou la réalisation du passage sous-voie est retardée.
- 2. Imposer une date de début de travaux plus rapide que celle calculée par les contraintes sur une zone de développement comme celle de l'école par exemple.
- 3. Des modifications sur les espaces publics ou sur les ratios de mixité peuvent également être réalisées en accord avec l'Autorité.
- **C. Du point de vue du Maître d'ouvrage** Le MO effectue uniquement des simulations sur son lot en effectuant des modifications sur les bâtiments et aménagements. Il peut ainsi réaliser plusieurs variantes et comparer les indicateurs techniques, environnementaux et financiers.

Proposition de modifications concrètes :

- 1. Modifier la géométrie des bâtiments.
- 2. Modifier le nombre de niveaux, le matériau d'ossature et la répartition des surfaces constructives (p. ex. augmenter la SUP au détriment de la SC et SD).
- 3. Adapter les aménagements extérieurs en fonction.

4.7 Résultats et analyses

Cette partie présente les différents rendus concrets obtenus grâce à l'outil ainsi qu'une analyse de la précision et fiabilité des résultats qui les composent. En effet, ce travail explore une approche quantitative et spatiale du développement immobilier sans pour autant être capable de fournir des valeurs totalement réalistes. Il y a ainsi un écart entre la réalité d'un développement immobilier en phases de réalisation ou d'exploitation et les indicateurs qui sont fournis au stade de l'étude de projet.

4.7.1 Rendus

Rapport Il peut être généré pour un lot, une zone de développement ou le périmètre entier. Un résumé des indicateurs par catégorie y est présenté pour la dernière variante calculée. Pour les lots, un tableau des valeurs par bâtiment est intégré ainsi qu'un diagramme de Gantt montrant les principales échéances en terme de phasage. Les rapports pour les zones de développement et le périmètre PA sont aussi composés de graphiques montrant la mixité sociale et fonctionnelle ainsi que la balance entre les coûts et recettes financières. Finalement, un diagramme de Gantt représentant les phases chantier (début travaux - fin travaux) de chaque zone de développement est affiché sur le rapport généré pour le périmètre entier.

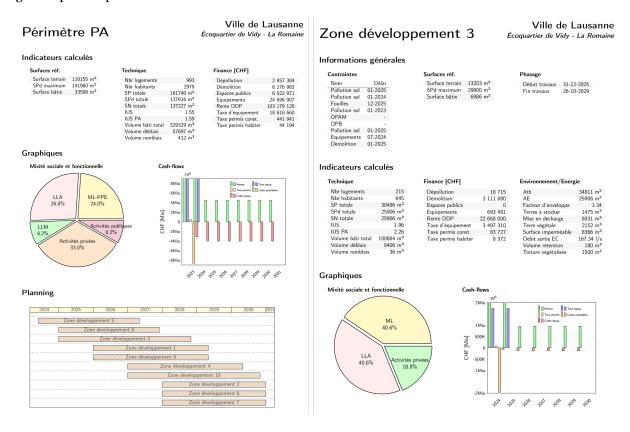


FIGURE 4.13 – Exemples de rapports générés automatiquement.

Comparaison de variantes Lorsque deux variantes sont calculées l'une après l'autre, la comparaison de variantes affiche une fenêtre avec des graphiques et une autre avec des tableaux. On y retrouve les graphiques de mixité, de cash flows et le diagramme de Gantt pour chacune des variantes disposés côte à côte. De même pour les tableaux avec les résumés des indicateurs par variante et par catégo-

rie. Une troisième colonne de tableaux est affichée montrant les différences mathématiques entre les deux variantes.

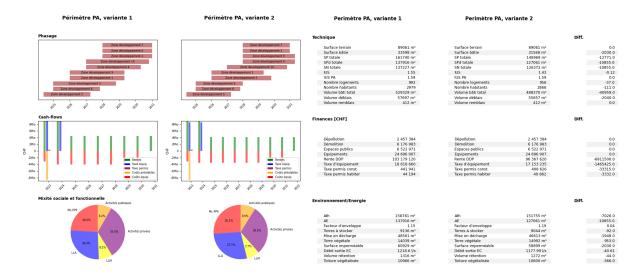


FIGURE 4.14 - Comparaison de variantes.

Export SméO Il s'agit d'un fichier XML composé de différentes balises qui contiennent chacune la valeur d'un indicateur lié à la dernière variante calculée que ce soit pour un lot, une zone de développement ou le périmètre entier. On y retrouve notamment la surface terrain, la surface bâtie, SPd, Volume bâti, nombre de bâtiments, facteur d'enveloppe, etc.

FIGURE 4.15 – Export d'un fichier XML pour SméO.

Animation temporelle Elle permet une visualisation dynamique du phasage calculé pour chaque lot et zone de développement lorsqu'on génère une simulation sur l'ensemble du quartier. Ainsi, en bougeant un curseur sur une barre temporelle, on voit s'afficher les lots et zones de développement dès le moment où la date du curseur temporel a atteint la date de début de travaux calculée pour une de ces entités. Puis, une fois que la date de fin de travaux est atteinte, les sous-entités tels que les bâtiments, aménagements et espaces publics s'affichent également au fil du temps.

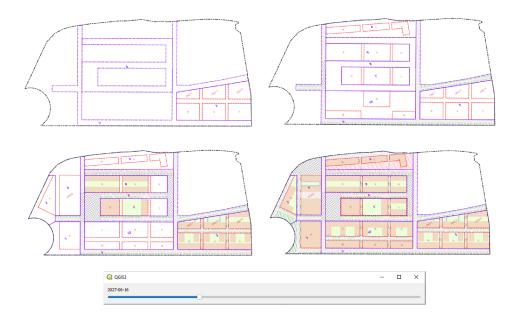


FIGURE 4.16 – Animation temporelle.

4.7.2 Précision et fiabilité des résultats

Une fois tous ces indicateurs obtenus, il est important de prendre du recul afin de bien interpréter les résultats. La notion de précision dans ce cadre correspond à l'écart entre une valeur obtenue par cet outil en phase d'étude de projet et la valeur réelle finale au terme du chantier. Cependant, ce biais est difficilement quantifiable car chaque projet de construction a ses propres contraintes et surtout ses imprévus qui ne peuvent pas systématiquement être anticipés. De plus, le but est que l'utilisateur puisse modifier les données en entrée de façon à s'approcher au mieux de la réalité. Il va pour cela se baser sur des projets similaires, notamment en ce qui concerne les prix référentiels à l'unité, et cela influence forcément les résultats financiers obtenus. Ainsi, les valeurs initiales étant la plupart du temps estimées ou projetées, l'indicateur de précision qui permet de dire si on est plutôt proche ou non de la finalité et forcément aléatoire.

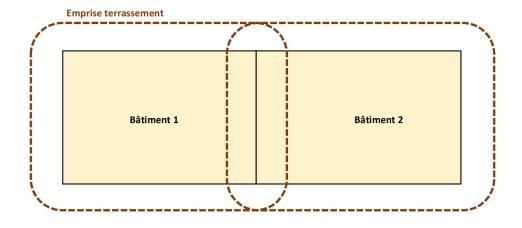


FIGURE 4.17 – Imprécision dans le calcul des déblais/remblais avec des bâtiments contigus.

Si on regarde tout cela d'un autre angle, les calculs en eux-mêmes font l'objet de choix techniques qui parfois influent sur le résultat peu importe les valeurs entrées par l'utilisateur. La précision d'un indicateur peut ainsi varier en fonction des méthodes de calcul utilisées. Typiquement pour les mouvements de terre, il y a uniquement le terrain naturel ou existant qui est pris en compte pour le calcul des volumes de déblais et remblais liés aux bâtiments. Or, il est préférable de tenir compte du terrain aménagé futur ainsi que du niveau +/- 0.00 fixé pour le bâtiment. C'est seulement dans ce cas que les volumes calculés peuvent se rapprocher au mieux de la réalité à venir. Actuellement, le niveau du rezde-chaussée est défini au niveau moyen du terrain naturel pour chaque bâtiment à partir duquel on détermine le fond de fouille en enlevant trois mètres si un sous-sol est prévu et huitante centimètres si non. Les surlargeurs de fouilles sont de un mètre tout autour des bâtiments et posent également un souci de précision lorsque deux bâtiments sont contigus car une partie du volume est comptée en double (cf. Figure 4.17). Il y a bien sûr d'autres exemples d'imprécisions dans les méthodes de calcul comme celle pour la surface d'enveloppe d'un bâtiment. En effet, celle-ci ne tient actuellement pas compte d'une éventuelle quinconce verticale des façades à savoir que l'attique peut être en retrait et ainsi réduire la surface d'enveloppe globale du bâtiment en question. Il est difficile de quantifier réellement la précision des indicateurs selon les méthodes de calcul car cela dépend fortement de la morphologie prévue. Par exemple, dans le cas des indicateurs précités sur les bâtiments, la qualité du résultat dépend avant tout de s'il y a une contiguïté et sur quelle longueur, si le bâtiment est isolé ou non, si son niveau du rez prévu est proche du terrain actuel et si tous les étages ont la même emprise. Néanmoins, une évaluation de la précision par type d'indicateur basée uniquement sur le choix de sa méthode de calcul est annoncée ci-contre.

Types d'indicateurs	Précision
Surfaces bâties, densités	Bonne
Volumes bâtis	Bonne
Volume terres	Moyenne
Rétention EC, toiture vég.	Moyenne
Ath, AE, facteur	Moyenne
d'enveloppe	
Coûts	Bonne
Taxes et rentes	Bonne
Dates phasage	Bonne

TABLEAU 4.7 – Précision estimée des indicateurs basée uniquement sur leur méthode de calcul.

La fiabilité, quant à elle, peut être analysée en évaluant la qualité de l'estimation qui est faite pour un attribut en entrée et l'influence qu'a ce dernier sur le résultat final d'un ou plusieurs indicateurs. Pour chacun de ceux-ci, il est alors possible de définir une estimation de sa fiabilité finale en se basant sur les données fournies dans ce modèle-ci. Il n'est pas tenu compte des données manquantes qui, si elles sont prises en considération, permettent de rendre les indicateurs plus réalistes. Chaque attribut de base est évalué quant aux nombre d'indicateurs dont il permet le calcul, la qualité de son estimation ainsi que son taux d'influence dans les calculs (cf. Tableau 4.8). Ainsi, on peut déterminer

une valeur moyenne par attribut ((qualité estimation + influence)/2) pour finalement obtenir une fiabilité par type d'indicateurs (cf. Tableau 4.9).

Attributs	Indicateurs liés	Qualité	Influence
		est.	
<u>Contraintes :</u>			
Délai	Dates phasage	90%	100%
Coût/m³	Coût démolition, Coût dépollution	80%	40%
Hauteur, profondeur	Coûts démolition, dépollution	90%	60%
Zone de développement :			
Date début travaux	Dates phasage	90%	100%
Espaces publics / Equip. :			
Туре	Coût équipements, Coût espaces publics,	90%	40%
	Rétention EC, toiture vég.		
Coût/m²	Coût équipements, Coût espaces publics	80%	60%
<u>Bâtiments</u> :			
Nombre niveaux	Surfaces bâties, densités, Volumes bâtis,	90%	80%
	Coût construction, Rente DDP, Taxes permis,		
	Ath, AE, Facteur d'enveloppe		
S-sol (oui/non)	Volumes terres, Coût terres	100%	50%
Matériau ossature	Volumes bâtis, Coût construction, Ath, AE,	100%	50%
	Facteur d'enveloppe		
Coût/m³	Coût construction	80%	50%
Valeurs foncières	Rente DDP	100%	60%
Ratios surfaces	Surfaces bâties, densités, AE, Facteur d'enve-	80%	50%
constructives	loppe, Rente DDP, Taxes permis		
Ratios mixité	densités	90%	70%
Aménagements :			
Type	Coût aménagements, Rétention EC, toiture	90%	40%
	vég.		
Coût/m²	Coût aménagements	80%	60%

TABLEAU 4.8 – Attributs entrés, qualité de l'estimation et poids dans les calculs.

4.7.3 Améliorations possibles

La précision des résultats peut être améliorée en adaptant les méthodes de calcul et en ajoutant des données de bases qui manquent. Pour ce qui est des calculs, les mouvements de terres peuvent évidemment être améliorés au vu de ce qui a été cité précédemment. Il est primordial de tenir compte d'un modèle de terrain aménagé, de corriger le problème des bâtiments contigus mais aussi de donner la possibilité à l'utilisateur de définir un sous-sol plus petit que l'emprise du rez voire d'avoir plusieurs sous-sols pour un même bâtiment.

Types d'indicateurs	Fiabilité
Surfaces bâties, densités	77%
Volumes bâtis	80%
Volume terres	75%
Rétention EC, toiture vég.	65%
Ath, AE, facteur	75%
d'enveloppe	
Coûts démolition,	68%
dépollution	
Coûts équipements,	68%
espaces publics	
Coût construction	75%
Coût aménagements	68%
Taxes et rentes	77%
Dates phasage	95%

TABLEAU 4.9 – Fiabilité estimée des indicateurs en fonction des attributs.

Le calcul de la surface d'enveloppe (Ath), lui, doit pouvoir tenir compte d'une quinconce verticale des façades en ajoutant par exemple un attribut de ratio qui fait office de facteur correctif de la surface. La surface de référence énergétique (AE) peut aussi être améliorée car normalement une petite partie de la SUS et de la SI, comme les débarras, locaux sanitaires ou cages d'ascenseur doivent également être pris en considération dans le calcul. Or, actuellement l'AE est considérée comme étant égale à la SPd. Cependant, il est bien clair qu'il est très compliqué d'estimer ces éléments en phase d'études de projets alors que les plans des bâtiments ne sont pas encore dessinés ou aboutis. La précision du coefficient de forme dépend évidemment de ces éléments.

Pour ce qui est des coûts, la grande amélioration est d'amener plus de données en entrée permettant d'avoir un calcul plus précis. Typiquement, il manque certaines contraintes comme, par exemple, la typologie du sous-sol (nappe phréatique, canalisations existantes, ouvrages souterrains) qui peuvent engendrer des coûts supplémentaires. La présence d'une nappe phréatique augmente les coûts de réalisation avec des fondations plus profondes et des cuvelages pour l'étanchéité des sous-sols. Les canalisations ou ouvrages existants nécessitent d'être démolis puis évacués ce qui fait monter la facture des travaux préparatoires.

La surface nécessaire de toiture végétalisée fait aussi l'objet d'une approximation dans le calcul. En effet, si le débit de sortie EC ainsi que le volume de rétention sont plutôt bien estimés en se basant sur les formules de la directive Municipale lausannoise pour la gestion des eaux claires, la surface de toiture végétalisée est calculée très simplement en divisant le volume EC à retenir par l'épaisseur du substrat végétal prévu. Autrement dit, on considère ici que la quantité d'eaux claires qu'il est possible de retenir est la même pour une toiture végétalisée que pour un bassin de rétention classique. Or, il est préférable de tenir compte d'un facteur correctif qui tienne compte de la capacité d'absorption

d'une telle toiture proportionnellement à son épaisseur.

Finalement, la fiabilité est améliorée au fil de l'avancement du projet. L'avantage d'utiliser cette maquette SIG est aussi de pouvoir faire évoluer les valeurs entrées plus les projets sont aboutis. Ainsi, la qualité d'estimation de ces attributs en est grandement améliorée et le résultat toujours plus réaliste.

5 Discussion

Ce chapitre amène à prendre du recul sur le travail effectué en analysant ses capacités et ses manquements sur différents points.

5.1 Transposabilité du concept de l'outil

Est-ce que oui ou non cet outil développé peut être utilisé et répondre à d'autres enjeux et contraintes pour d'autres projets immobiliers ailleurs?

Un des buts initial de ce projet est de développer un concept d'outil d'aide à la décision qui soit capable de fonctionner pour différents développements immobiliers urbains. Bien que la finalité soit une application concrète sur le projet des Prés-de-Vidy, la structure des données de bases ainsi que le modèle de données initial ont été conçus de manière à être le plus universel possible. Si on regarde la structure des données, les entités de base à savoir le lot, la zone de développement et le périmètre du plan d'affectation, sont très générales et peuvent très bien s'appliquer à n'importe quel quartier en Suisse. Il en est de même pour les sous-entités comme les équipements/espaces publics, bâtiments, aménagements et contraintes qui sont des éléments constitutifs de beaucoup de développements immobiliers.

C'est plutôt du côté du modèle de données créé et de l'interprétation qui peut en être faite où des adaptations sont certainement nécessaires avant de pouvoir être appliqué ailleurs. Par exemple, du point de vue du foncier, tout est mis en place pour préconiser les DDP. Une rente est systématiquement calculée et mise en perspective avec les autres coûts et recettes pour chaque variante calculée. Le DDP est effectivement une structure foncière qui est très à la mode dans le développement immobilier mené par une Autorité publique car il permet des rentrées d'argent et d'imposer aux superficiaires certains quotas permettant d'atteindre des objectifs d'intérêt public (mixité, consommation énergétique). Cependant, il n'est pas toujours utilisé notamment dans des développements où les terrains appartiennent à de multiples propriétaires fonciers dont chacun veut récupérer une parcelle avec des droits à bâtir pour finalement vendre ou louer de la surface de plancher une fois les bâtiments construits. Par exemple, dans le cas d'un terrain à bâtir composé de plusieurs parcelles appartenant à divers propriétaires privés qui se mettent ensemble pour monter un projet immobilier et faire fructifier la valeur de leurs terrains. Cela peut aussi être une Commune qui initie le développement et doit trouver des accords avec les propriétaires. Ce genre de situation foncière, plus complexe que celle présentée aux Prés-de-Vidy, impose également des contraintes supplémentaires liées au remaniement parcellaire et aux négociations y relatives engendrant des délais durant lesquels le terrain ne peut être ni bâti ni aménagé. Cela dit, le modèle de données actuel permet tout à fait d'ajouter d'autres contraintes et d'y associer un délai et/ou un coût ainsi qu'une emprise géographique.

Pour ce qui est des indicateurs calculés à partir de ce modèle, la plupart d'entre eux sont utiles et concernent la majorité des projets de quartiers. Il y a bien sûr les aspects de rétention EC, toiture végétalisée ou mixité sociale et fonctionnelle qui sont très ciblés sur le mode de fonctionnement lausannois. En effet, ceux-ci ne font pas toujours partie intégrante d'un développement immobilier mais de plus en plus de politique publique les imposent un peu partout. Dans cet outil, les méthodes de

calcul pour ces indicateurs sont tirées des réglementations et directives communales lausannoises en la matière et doivent être adaptées pour d'autres projets.

5.2 Apports et lacunes pour les acteurs

Au final, quels sont les apports bénéfiques de cet outil pour les acteurs visés et où sont les manquements?

Autorité publique Avec cet outil, l'Autorité publique obtient une vision d'ensemble du développement qui lui permet, au fur et à mesure de son évolution, de vérifier que les objectifs d'intérêt public sont atteints. Ainsi, pour le périmètre entier du futur quartier ou une zone de développement, elle peut connaître le nombre de logements et d'habitants attendus, la répartition en matière de mixité ainsi que des aspects environnementaux ou énergétiques comme les surfaces imperméables générées et la surface de toiture végétalisée totale. L'intérêt financier est également intéressant dans le sens où il est possible de totaliser les coûts de travaux préparatoires, d'équipements et d'espaces publics qui sont parfois avancés par la Commune surtout dans le cas des Prés-de-Vidy où elle est également propriétaire foncière. Ces coûts peuvent être comparés avec les recettes perçues comme la rente DDP ou les taxes (équipements, permis de construire, permis d'habiter).

Bien sûr tout cela est à mettre en perspective car il manque également certains indicateurs qui peuvent être utiles à une Autorité publique. Par exemple, liés à d'autres politiques publiques comme la mobilité pour laquelle il est possible de calculer un nombre de places de stationnement par rapport aux nombres d'habitants et de logements. De même pour le stationnement des vélos qui est un enjeu majeur avec les objectifs et réglementations actuels en matière de mobilité douce. Du point de vue environnemental, on peut aussi imaginer calculer des indicateurs en relation avec les espaces verts et le nombre d'arbres à planter. Ceci est aussi un point important pour une Commune afin d'éviter les îlots de chaleur et de créer des barrières écologiques permettant de préserver la faune et la flore mais aussi pour limiter l'impact paysager du futur quartier.

Développeur immobilier Les aspects organisationnels qui définissent le phasage ainsi que le suivi des indicateurs techniques et financiers tout au long de l'avancement du projet puis du chantier sont les points importants que recherche un développeur immobilier. Avec l'outil développé, il peut obtenir une bonne partie de ces éléments mais il existe certains points manquants. Du côté des finances, les coûts liés à la pose des réseaux (évacuation eaux, eau potable, chauffage, électricité, etc.) ainsi qu'aux infrastructures publics telles que le passage sous-voie ou la passerelle piétonne ne sont pas calculés. En effet, par manque de temps, les données y relatives n'ont pas pu être intégrées ce qui fausse le calcul du coût lié aux équipements et espaces publics qui ne tient compte que des places, parcs, chemins et routes d'accès, bandes vertes et parkings. Pour les aspects techniques, comme mentionné plus tôt, les indicateurs liés à la gestion des terres ne tiennent pas compte de suffisamment de données de base pour pouvoir offrir une vraie vision globale des terres à stocker sur place et celles à évacuer. Ainsi, il est difficile de prévoir les zones de stockage nécessaires et leur emprise. Ce qui mène au point suivant concernant le phasage de chantier pour lequel l'outil offre une vraie plus-value en permettant de générer un calendrier de phasage pour l'ensemble des zones de développement en

fonction des contraintes modélisées et leur délai d'échéance. Néanmoins, cela donne une bonne idée de l'ordonnancement général des travaux au stade du projet mais qui n'est pas suffisante en phase de réalisation pour le suivi et la coordination de chantier. Pour ce faire, il est nécessaire d'intégrer plus de contraintes à la maquette comme justement des zones prévues pour le stockage des terres, pour l'implantation des grues ainsi que pour les installations de chantier. Chacune de ces contraintes à vocation purement organisationnels se voient imposer un délai comme les autres. De plus, le modèle de données permet facilement l'intégration de ces contraintes en l'état actuel.

MO Pour le MO, l'outil permet d'obtenir un bon aperçu (coûts, surfaces, volumes) de l'état de son lot et ses bâtiments jusqu'à la fin de la réalisation. L'avantage majeur est qu'il est évolutif dans le sens où le MO peut moduler son projet dans la maquette SIG en fonction de ses besoins et plus le projet est détaillé plus il peut entrer des valeurs précises et ainsi obtenir des indicateurs réalistes. Le résumé des coûts de construction et d'aménagements combinés aux taxes et rente à verser lui donne une bonne idée de l'investissement total engendré pour chaque variante calculée. Ce qui manque à ce niveau là c'est de pouvoir effectuer une projection sur le long terme (jusqu'à échéance du DDP) en estimant, selon un certain taux d'intérêt, les recettes annuelles qui sont perçues avec les loyers mais aussi les dépenses pour l'entretien notamment. Cela permet d'avoir la balance globale entre dépenses et recettes pour en sortir une valeur de rendement ainsi que d'évaluer le risque pris avec l'investissement initial calculé par l'outil.

5.3 Cohérence globale des résultats

La grande force de l'outil développé est qu'en changeant peu de valeurs en entrée une grande partie des indicateurs en sont modifiés. Tout est donc lié et cela montre une bonne cohérence entre les différents résultats évitant ainsi les disparités. Par exemple, en changeant juste la géométrie d'un bâtiment et des aménagements qui l'entourent, cela va modifier les trois-quarts des indicateurs calculés par rapport à la variante précédente. Les surfaces, volumes et densités (IUS, nombre logements/habitants), bien sûr, mais aussi les coûts et taxes qui sont directement liés aux aspects techniques ainsi que l'ensemble des indicateurs environnementaux et énergétiques. Il en est de même si sa surface ne change pas et que c'est uniquement le nombre de niveaux d'un bâtiment qui est modifié. L'adaptation d'un délai de contrainte ou d'un coût à l'unité a une influence sur les coûts et le phasage de chantier. L'atout de cet outil est aussi le fait que l'ordonnancement des travaux est totalement recalculé à l'échelle du quartier non seulement en fonction des délais entrés et de l'emprise des contraintes mais tient également compte des intentions du développeur et/ou de l'Autorité. Typiquement, s'il est urgent de construire l'école en priorité pour répondre à une forte demande, l'utilisateur peut imposer une date de début de travaux pour cette zone de développement qui est prise en considération dans le calcul. Au final, la combinaison de plusieurs modifications sur différentes entités de la maquette a un effet global sur les indicateurs pour lesquels les effets s'additionnent, chaque indicateur étant souvent dépendant de plusieurs valeurs initiales. Néanmoins, la maquette n'est évidemment pas complète car, comme précité, un certain nombre de données et d'attributs de base ainsi que d'indicateurs en sortie sont manquants.

5.4 Simplicité de mise en oeuvre

D'un point de vue technique, l'outil a été développé de façon à être le plus accessible et modulable possible. Une grande partie des logiciels utilisés sont libres d'accès et la structure mise en place permet d'ajouter des fonctionnalités en ayant la possibilité de les développer en dur au travers du plugin QGIS. Les données nécessaires au montage d'une maquette pour simuler un développement immobilier proviennent souvent de différents services et bureaux techniques. Celles-ci peuvent être rassemblées par un développeur, qui se charge du montage de la maquette, puis intégrées dans la base de données présentée dans ce travail. C'est pour cette intégration qu'il est préférable d'utiliser le logiciel FME car il est capable de lire la plupart des données de différents formats et de les transformer afin qu'elles soient intégrées par la base de données. Ce logiciel est le seul utilisé qui n'est pas open source mais qui offre une grande liberté en matière de pré-traitement des données. Ensuite, tout est géré à partir de QGIS couplé à Python, langage qui est à la base du fonctionnement du simulateur. Ce type de logiciel gratuit permet à tout un chacun, dans la limite de ses connaissances, de développer lui-même ses propres fonctionnalités au travers de plugins QGIS qui interagissent avec l'interface cartographique propre au SIG. De plus, il faut préciser que le temps consacré pour la mise en place, du point de vue technique, de l'outil présenté est assez faible. Avec des connaissances raisonnablement accessibles en programmation, il faut environ trois mois de travail pour obtenir un outil fonctionnel.

6 Perspectives

Ici, il est question d'étudier les possibilités d'évolution d'un tel outil en gardant sa structure basée sur une modélisation SIG.

6.1 Suivi et gouvernance

L'outil développé a pour vocation initiale d'être utilisé au stade des études de projet et projets d'ouvrages. Cependant, le potentiel peut être plus grand en permettant tout le suivi et la gouvernance pour les phases de réalisation et d'exploitation. L'utilisation d'un SIG et la possibilité de calculer de multiples variantes sont évolutives car un utilisateur peut sans cesse alimenter la maquette en affinant les variables. A tout moment durant le chantier il peut y avoir un imprévu qui nécessite de recalculer le planning, de mettre à jour les indicateurs techniques et d'en voir les effets sur les coûts et recettes. Bien sûr cela nécessite plus de données comme des contraintes organisationnelles (installations de chantier, grues, zones de stockage), des réseaux et des géométries de bâtiments plus précises en 3D.

En phase d'exploitation, un MO ou propriétaire peut avoir un intérêt à utiliser cette maquette pour le suivi et la gestion de ses ouvrages. Par exemple, on peut imaginer simuler des frais annuels d'entretien, d'assurances, de gestion ou liés aux taxes mais aussi des recettes (loyers) et ce sur plusieurs dizaines d'années. Cela donne aussi la possibilité d'avoir un suivi permettant de bien répartir les tâches en matière d'entretien, d'anticiper les remises en état et de définir les charges demandées aux locataires. D'autres indicateurs supplémentaires peuvent être utiles comme la consommation énergétique (y compris énergie grise) ou l'apport en énergie renouvelable. Tout cela demande une maquette avec une précision bien plus grande qui doit se rapprocher du BIM, c'est-à-dire avec des morphologies de bâtiment entièrement 3D et un niveau de détail élevé du moins pour les extérieurs. Il faut en effet avoir des surfaces et volumétries les plus précises possibles pour estimer ces indicateurs spécifiques. Pour ce qui est des intérieurs, les ratios de constructions actuels (SC, SUP, SUS, SD, SI) peuvent très bien suffire s'ils sont affinés selon les derniers plans d'exécution. Entre autres, des données relatives aux surfaces et productivité des panneaux solaires, notamment, sont aussi nécessaires. Par ailleurs, ce qui est déjà possible avec la maquette actuelle en phase d'exploitation est de pouvoir comparer les valeurs réelles avec les indicateurs qui ont été calculés en phase d'études et ainsi vérifier si les objectifs sont atteints.

Un autre point qui peut être amené avec ce simulateur est de pouvoir effectuer des calculs sur des bâtiments existants qui doivent être transformés ou rénovés. Typiquement, dans le périmètre du plan d'affectation aux Prés-de-Vidy il y a le CALV dont les bâtiments peuvent être agrandis et qui n'ont pas du tout été pris en compte dans le cadre de ce travail. Le modèle de données doit être adapté pour tenir compte de bâtiments existants et structures foncières existantes sur lesquels certains des indicateurs peuvent être utiles. Cependant, les méthodes de calculs ne sont pas toujours les mêmes car les futurs bâtiments ont des parties pré-existantes auxquelles s'ajoutent des agrandissements ou rehaussements. De nouveaux indicateurs peuvent aussi apparaître comme des coûts de rénovations qui s'appliquent à l'existant en complément des coûts de construction qui concernent la partie nou-

velle. Les coûts d'équipements et ceux liés aux travaux préparatoires, quant à eux, disparaissent ou du moins diminuent fortement.

6.2 Interface utilisateur

L'interface utilisateur est un élément essentiel pour rendre l'outil accessible à tous. Cependant, par manque de temps, les développements et recherches sur le fond ont été privilégiés à ceux sur la forme dans ce travail. En l'état actuel, un utilisateur souhaitant effectuer des simulations doit tout de même avoir une bonne connaissance de l'interface générale de QGIS et savoir utiliser les outils de dessin et de renseignement des tables attributaires. Pour pouvoir réaliser des modifications facilement dans la maquette, il faut créer une interface qui permette d'ouvrir une fenêtre lors de la sélection d'un objet dans laquelle on a directement accès aux attributs y relatifs. L'adaptation des géométries doit elle aussi être améliorée en créant des outils qui facilitent la modification. Par exemple, pour les bâtiments avoir des accrochages automatiques qui forcent l'orthogonalité des façades. La topologie entre les entités peut aussi être automatisée de façon à ce que lorsqu'on modifie les dimensions d'un objet, les entités alentours s'adaptent en fonction.

Il est également envisageable de ne pas utiliser QGIS en créant une interface web dans laquelle on peut afficher les données de la maquette et ainsi avoir une structure beaucoup plus simple avec uniquement les outils et fonctionnalités nécessaires au fonctionnement du simulateur. Dans ce cadre, il est possible d'envisager un système de connexion par utilisateur ou chacun doit s'identifier selon son rôle dans le développement immobilier. Ainsi, il a accès aux droits de modifications et de calculs sur certaines entités en fonction de son rôle. Typiquement, un MO n'a pas l'autorisation d'effectuer des modifications de délais de contraintes ni d'imposer des dates de début de travaux. En clair, il a accès à la modification sur les lots, bâtiments et aménagements à savoir les entités qui le concernent directement et ne peut générer des résultats que sur celles-ci. Une autorité publique peut réaliser des simulations sur le périmètre entier et le développeur immobilier sur l'ensemble des entités.

6.3 Intégration de la 3D

Dans le cas où cet outil est utilisé après la phase d'étude de projet, l'utilisation de données de base en 3D devient nécessaire. Avec des typologies de bâti plus précises, une grande majorité des indicateurs calculés deviennent plus réalistes. Il devient par exemple plus aisé d'avoir des variantes de bâtiment avec plusieurs sous-sols de différents volumes. Les surfaces d'enveloppe peuvent ainsi tenir compte d'éventuels retraits de façades et les surfaces de plancher ou volumes bâtis en sont également corrigés. Par extension, tous les coûts et recettes liés aux bâtiments sont aussi affinés. Le modèle de données tel qu'il a été conçu est déjà capable d'intégrer des données en 3D. Néanmoins, toutes les formules actuels des indicateurs doivent être corrigées car on part directement avec des bâtiments volumétriques en entrée et non surfaciques. Ainsi, les attributs de base tels que le nombre de niveaux ou le calcul de la hauteur des façades ne sont plus nécessaires. Au delà des bâtiments, les autres entités qui ont une utilité à être exploitées déterminées en 3D sont les modèles de terrain naturel et aménagé pour un calcul plus précis des mouvements de terres ainsi que certaines contraintes, tels que les bâtiments existants à démolir ou les terres polluées. Toutes ces données 3D peuvent diffici-

lement être modélisées directement dans QGIS mais proviennent de toute manière de mandataires spécialisés qui les dessinent sur un logiciel adapté. Ces informations sont ensuite reprises et formatées avec un logiciel comme FME pour être intégrées à la base de données et affichées dans QGIS qui permet tout de même une visualisation 3D.

6.4 Pré-traitement des données de base

Afin de faciliter l'intégration des données de base dans la maquette, il est nécessaire que chaque service ou mandataire qui en produit les fournisse en un format d'échange standardisé. On peut par exemple dire que toutes les données provenant de sources extérieures comme les périmètres et zones du PA, les emprises de contraintes (pollutions, bâtiments existants, fouilles archéologique, etc.), les projets de bâtiments et espaces publics soient fournies au développeur immobilier dans des formats facilement échangeables comme le SHP ou le DXF. Les données fournies doivent bien sûr avoir été géoréférencées au préalable dans le système de coordonnées suisse. Tous ces éléments sont regroupés et peuvent ensuite être reformatés et intégrés à la base de données de la maquette à l'aide d'un processus automatisé développé avec le logiciel FME. Ce dernier prend en charge les données selon leur format, récupère leurs attributs, s'il y en a, et fait la correspondance entre le nom de l'attribut en entrée et celui nécessaire en sortie. Si aucun attribut n'est renseigné cela peut se faire plus tard dans QGIS. La base de données en sortie ayant également besoin de clés primaires (identifiant unique) et étrangères par table de données, FME va permettre de les attribuer de façon automatique en allouant un numéro unique à chaque entité. Pour ce qui est des clés étrangères, FME va déjà effectuer des intersections spatiales entre les objets afin de définir, par exemple, quel bâtiment est associé à quel périmètre. Au final, les données sont intégrées directement dans les tables vierges de la base de données pré-instanciée.

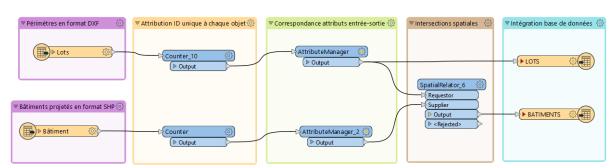


FIGURE 6.1 – Processus automatisé d'intégration de données avec FME.

7 Conclusion

Le développement immobilier est un processus complexe qui est soumis à de nombreuses règles tant de droit public que de droit privé. Énormément d'acteurs y interviennent dès la phase de planification et jusqu'à l'exploitation des ouvrages. Ce travail offre la possibilité, dans ce contexte, de simuler différentes variantes de développement et d'en tirer des conclusions d'un point de vue purement quantitatif (coûts, recettes, surfaces, volumes, densités, etc.). Couplé à une interface SIG, l'outil développé tient compte de la composante spatiale des données qui composent un futur quartier. Les modifications attributaires ou géométriques effectuées par les utilisateurs affinent toujours plus le résultat final et permettent ainsi de le rendre plus réaliste. De plus, il ressort également une complémentarité de l'outil et des indicateurs fournis, quant aux aspects techniques et énergétiques (SPd, Volume bâti, AE, Ath, Facteur d'enveloppe, etc.) des bâtiments, avec des outils d'aide à la décision existants en matière de durabilité. Par ailleurs, tout l'aspect qualitatif du développement immobilier n'est pas pris en compte par l'outil développé et a une toute aussi grande importance dans ces grands projets. Il s'agit notamment de la qualité des équipements et aménagements collectifs, de la typologie du bâti, des objectifs environnementaux et de durabilité, de l'intégration sociale ou de l'accessibilité. Certains indicateurs quantitatifs fournis par l'outil tels que les types de logements/activités, les routes d'accès, les surfaces imperméables ou encore les toitures végétalisées permettent toutefois d'entrevoir ces aspects à l'échelon local. Il est cependant utile d'avoir un regard plus général sur la qualité du projet à plus grande échelle en tenant compte de ses alentours et des besoins de la population.

Le développement de l'outil a fait appel à des compétences en SIG et gestion de base de données orientée objet. Un modèle de données a été implémenté avec la vocation d'être relativement simple dans sa structure de façon à être potentiellement applicable à d'autres situations que celle du projet des Prés-de-Vidy sous réserve de quelques adaptations. Les attributs de base qui doivent être renseignés pour chaque entité ont été réduits au maximum afin de simplifier l'utilisation. De plus, un système de stockage des différentes variantes calculées a été mis en place dans le but de pouvoir les comparer entre elles. Puis, les données de base ont été regroupées, structurées et modélisées pour être finalement intégrées à la maquette SIG qui est l'illustration concrète du modèle de données et des ces différentes couches. Au final, l'outil qui est la combinaison d'une interface cartographique et d'un programme de calcul fourni différents rendus statiques et dynamiques qui donnent un aperçu détaillé et chiffré de la variante simulée sur un périmètre (lot, zone de développement ou périmètre PA).

Pour conclure, ce travail m'a permis d'approfondir mes connaissances acquises durant mon cursus notamment en matière de SIG et de planification territoriale puis d'en amener de nouvelles dans le domaine du développement immobilier. Le sujet de ce mémoire est fort intéressant car il s'intègre dans une problématique concrète et actuelle. De plus, il lie l'aspect réflexif, qui est d'amener un outil d'aide à la décision avec une approche quantitative dans un contexte existant et complexe, au côté technique avec la programmation informatique et l'utilisation d'outils SIG.

Bibliographie

- BELK, B. (2012). *Maximiser l'évaluation et la rentabilité d'un terrain à bâtir depuis sa phase de classement et pendant l'ensemble du cycle de développement immobilier.* [thèse de doct., Zürich].
- BÜHLMANN, L. (2021). Introduction à l'aménagement du territoire.
- DOGAN, T., YANG, Y., SAMARANAYAKE, S., & SARAF, N. (2020). Urbano: a tool to promote active mobility modeling and amenity analysis in urban design. *Technology*|*Architecture* + *Design*, 4(1), 92-105. https://doi.org/10.1080/24751448.2020.1705716
- DOMER, B., RINQUET, L., & JOSS, F. (2017). *Le management du projet de construction : un vademecum d'économie, de droit et de planification pour le bâtiment.* Presses polytechniques et universitaires romandes.
- EBERHARD, R. (2022). Introduction à l'estimation foncière.
- ECOBAU. (2023). *ecobau* [ecobau]. Récupérée février 24, 2023, à partir de https://www.ecobau.ch/fr/instruments/construction-durable/norme-de-comprehension-sia-112-1
- ECOSCAN SA. (2019). Analyse de pollution des sols et évaluation de la menace.
- ETAT DE GENÈVE DIRECTION DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE. (2006, septembre). Plan directeur de quartier n° 29'500 526 les Vergers.
- Règlement d'application de la loi du 16 mai 2006 sur l'énergie (RLVLEne, RS 730.01.1) (2006, octobre 4). Récupérée février 24, 2023, à partir de https://www.lexfind.ch/fe/fr/tol/18902/versions/95646/fr
- GOLAY, Y., PYROTH, C., JOBIN, O., TORNARE, G., & FLORET, J.-C. (2022). Efficacité énergétique et durabilité des bâtiments et constructions Bilan 2016–2021 Perspectives 2022–2026. Récupérée février 24, 2023, à partir de https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/dinf/sipal/fichiers_pdf/Rapport_efficacit%C3%A9_%C3%A9nerg%C3%A9tique_Bilan_Perspectives_WEB_def.pdf
- LEROUX, B., & CEREMA OUEST. (2018). Urbansimul Dossier technique.
- ROULET, Y., & LIMAN, U. (2009). Jalons 06 SméO Fil Rouge pour la Construction durable. Récupérée février 24, 2023, à partir de https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/developpement_durable/publications/jalons_06 smeo_fil_rouge_construction_durable_2009_72dpi.pdf
- ROULET, Y., & LIMAN, U. (2021). Introduction à l'utilisation de SméO. Récupérée février 24, 2023, à partir de https://www.smeo.ch/wp-content/uploads/Mode_emploi_SMEO_v.8.0_v2.5.pdf
- SECTION ARCHÉOLOGIE CANTONALE. (2018). Cahier des charges Fouilles archéologiques Lausanne Prés-de-Vidy.

- SEED NEXT GENERATION LIVING, ASSOCIATION SUISSE POUR DES QUARTIERS DURABLES. (2020). SEED

 Next Generation Living [SEED Next Generation Living]. Récupérée février 24, 2023, à partir de https://seed-certification.ch/la-demarche/
- SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES. (2006). SIA 421 "Aménagement du territoire Indices d'utilisation du sol".
- SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES. (2017). SIA 112/1 "Construction durable Bâtiment".
- SPATIOMATICS. (2023). *Spatiomatics SIMO app.* Récupérée mai 22, 2023, à partir de https://www.spatiomatics.com/#Benefits
- VILLE DE LAUSANNE. (2010, mai). Taxes et émoluments perçus par la Ville de Lausanne pour les permis de construire, de transformer, d'habiter et d'utiliser.
- VILLE DE LAUSANNE. (2016, décembre). Directive municipale relative aux mesures de gestion des eaux claires.
- VILLE DE LAUSANNE. (2019, janvier). Toitures végétalisées Guide de recommandations.
- VILLE DE LAUSANNE BDM. (2014, mai). Compte-rendu de l'atelier professionnel « Définition des enjeux et objectifs ».
- VILLE DE LAUSANNE BDM. (2017, février). Prés-de-Vidy Programme des mandats d'études parallèles.
- VILLE DE LAUSANNE BDM. (2018, avril). Prés-de-Vidy Schéma directeur.
- VILLE DE LAUSANNE BDM. (2023). *Ecoquartier des Prés-de-Vidy* [Site officiel de la Ville de Lausanne]. Récupérée mai 25, 2023, à partir de https://www.lausanne.ch/officiel/grands-projets/metamorphose/pres-de-vidy.html
- VILMIN, T. (2015). L'aménagement urbain : acteurs et système. Éditions Parenthèses.

Annexes

A. Maquette



B. Résultats

Sur les pages suivantes sont présentés les différents rendus générés par l'outil développé. Dans un premier temps, les rapports par entité de base à savoir le lot, la zone de développement et le périmètre du PA. Chaque rapport est légèrement différent et contient des indicateurs et graphiques adaptés à l'échelle de simulation et le ou les acteurs visés. Tous les rapports contiennent une première partie avec des tableaux contenant les indicateurs calculés par catégorie (phasage, finances, technique et environnement/énergie) ainsi que les contraintes impactant directement l'entité concernée. Autrement dit, chaque périmètre de la couche "contraintes" de la maquette qui intersecte spatialement l'entité simulée est figuré dans ce tableau. La deuxième partie des rapports contient des graphiques qui sont des diagrammes de Gantt pour le phasage des lots ou du périmètre PA, des cash flows pour les zones de développement et périmètre PA avec distinction des dépenses et recettes ainsi que des diagrammes circulaires pour la mixité sociale et fonctionnelle à l'échelle des zones de développement et du périmètre PA. Concernant les cash flows, les rentes DDP sont annuelles contrairement à la valeur indiquée dans le tableau "Finances" qui est une rente unique. Les rentes pour les deux premières années sont plus élevées lorsqu'il y'a des logements en PPE ou ML qui sont prévus dans ce périmètre. En effet, une partie de la rente totale est prélevée en rente unique au début pour ces types de logements. Les coûts d'équipements et espaces publics sont dépensés à hauteur de 10% avant travaux puis les 90% restants sont répartis sur les années suivantes. Le diagramme de Gantt généré pour le périmètre PA représente les périodes de chantier pour chaque zone de développement.

Ensuite, les comparaisons de variantes permettent d'analyser les résultats de deux simulations lancées à la suite sur un même périmètre ou deux périmètres distincts de la même entité de base. L'utilisateur lance une première variante sur le périmètre PA, par exemple, puis effectue des modifications (géométriques et attributaires) et calcule une deuxième variante. Ainsi, il peut obtenir dans une même fenêtre les tableaux des indicateurs côte à côte avec mise en évidence des différences ainsi que les graphiques de phasage, cash flows et mixité sur lesquels il peut visuellement constater les changements.

Finalement, l'export XML pour SméO contient les indicateurs qui peuvent être récupérés pour éventuellement être importés dans SméO. La première partie du fichier contient les valeurs totalisées sur l'ensemble du périmètre de simulation. Puis, dans la seconde partie, les valeurs exportées sont celles par bâtiment contenu dans le périmètre. En effet, SméO a également besoin des indicateurs calculés pour chaque bâtiment.

B1. Rapports

Périmètre PA

Périmètre PA

Ville de Lausanne

Écoquartier de Vidy - La Romaine

Indicateurs calculés

Surfaces réf.

 $\begin{array}{lll} \text{Surface terrain} & 110155 \text{ m}^2 \\ \text{SPd maximum} & 141960 \text{ m}^2 \\ \text{Surface bâtie} & 33598 \text{ m}^2 \end{array}$

Technique

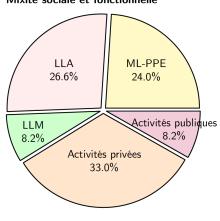
Nbr logements	993
Nbr habitants	2979
SP totale	161740 m ²
SPd totale	137916 m²
SN totale	137227 m ²
IUS	1.55
IUS PA	1.59
Volume bâti total	529329 m ³
Volume déblais	57697 m ³
Volume remblais	412 m ³

Finance [CHF]

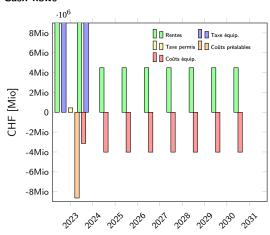
Dépollution	2 457 384
Démolition	6 176 983
Espaces publics	6 522 971
Equipements	24 696 907
Rente DDP	103 179 120
Taxe d'équipement	18 618 660
Taxe permis const.	441 941
Taxe permis habiter	44 194

Graphiques

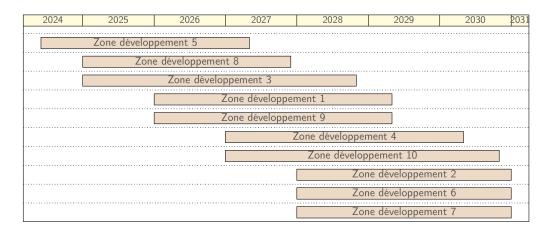
Mixité sociale et fonctionnelle



Cash-flows



Planning



Zone de développement

Zone développement 3

Ville de Lausanne Écoquartier de Vidy - La Romaine

Informations générales

Contraintes Nom Délai Pollution sol 01-2025 01-2024 Pollution sol Fouilles 12-2025 01-2023 Pollution sol **OPAM** OPB Pollution sol 01-2025 07-2024 Equipements Démolition 01-2025

Surfaces réf.	
Surface terrain	13203 m ²
SPd maximum	29800 m ²
Surface bâtie	6986 m ²

i ilasage	
Début travaux	31-12-2025
Fin travaux	26-10-2029

Phasage

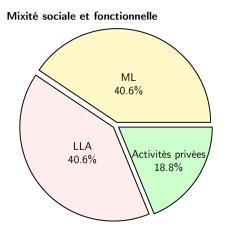
Indicateurs calculés

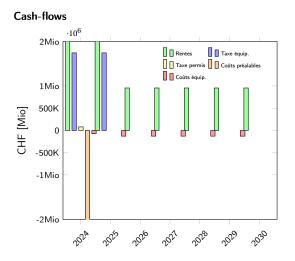
Technique						
Nbr logements	215					
Nbr habitants	645					
SP totale	30486 m²					
SPd totale	25906 m ²					
SN totale	25906 m ²					
IUS	1.96					
IUS PA	2.26					
Volume bâti total	100664 m ³					
Volume déblais	8406 m ³					
Volume remblais	36 m³					

Finance [CHF]					
	Dépollution	18 715			
	Démolition	3 111 880			
	Espaces publics	0			
	Equipements	693 481			
	Rente DDP	22 668 000			
	Taxe d'équipement	3 497 310			
	Taxe permis const.	83 727			
	Taxe permis habiter	8 372			

Environnement/Energie				
Ath	34811 m ²			
AE	25906 m ²			
Facteur d'enveloppe	1.34			
Terres à stocker	1475 m³			
Mise en décharge	6931 m³			
Terre végétale	2152 m³			
Surface imperméable	8366 m²			
Débit sortie EC	167.34 l/s			
Volume rétention	180 m³			
Toiture végétalisée	1500 m^2			

Graphiques





Les coûts d'équipements ici sont très faibles car la zone de développement n° 3 est majoritairement composée de lots privatifs (cf. Annexe A). Une grande partie des coûts d'équipements totaux est attribuée à la zone de développement n° 1 sur laquelle est prévue le parking souterrain.

Lot

Lot L

Ville de Lausanne Écoquartier de Vidy - La Romaine

Informations générales

Surfaces réf.					
Surface terrain	2934	m ²			
SPd maximum	8500	m ²			
Surface bâtie	1833	m ²			
Bâtiment N°		9	12	11	10
Surface bâtie		1059	246	248	280
Nombre niveaux		5	4	5	6
Sous-sol?		False	False	False	True
Hauteur		16.3	13.3	16.3	19.3
Ath		5200	1345	1547	1870
AE		4765	885	1116	1512
Facteur d'envelop	оре	1.09	1.52	1.39	1.24

Phasage

01-01-2025
03-03-2025
01-01-2027
31-12-2029
31-01-2030

Indicateurs calculés

Technique					
	Nbr logements	86			
	Nbr habitants	258			
	SP totale	9199 m²			
	SPd totale	8278 m²			
	SN totale	7589 m²			
	IUS	2.82			
	IUS PA	2.9			
	Volume bâti total	30029 m ³			
	Volume déblais	2572 m ³			
	Volume remblais	0 m ³			

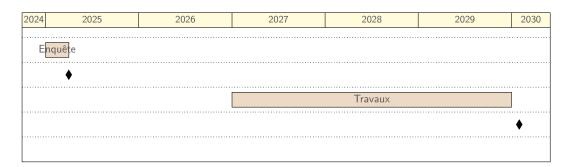
Finance [CHF]

Dépollution	155 083
Démolition	0
Gestion des terres	188 190
Bâtiments	20 232 210
Aménagements	98 114
Rente DDP	6 371 320
Taxe d'équipement	1 117 530
Taxe permis const.	26 301
Taxe permis habiter	2 630

Environnement/Energie

Ath	9962 m²
AE	8278 m^2
Facteur d'enveloppe	1.2
Terres à stocker	481 m³
Mise en décharge	2091 m ³
Terre végétale	573.0 m ³
Surface imperméable	1983 m^2
Débit sortie EC	39.66 l/s
Volume rétention	42 m³
Toiture végétalisée	350 m ²

Planning

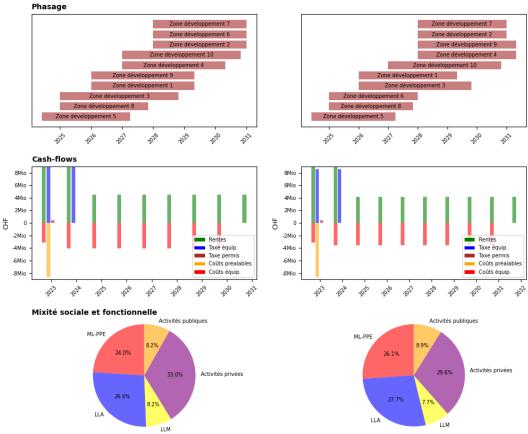


Le phasage des lots est plus détaillé que les autres entités avec une date pour la mise à l'enquête publique définie deux avant le début des travaux. Les losanges noir sur le diagramme correspondent à la date estimée pour la délivraison du permis de construire puis du permis d'habiter.

B2. Comparaison de variantes



Périmètre PA, variante 2

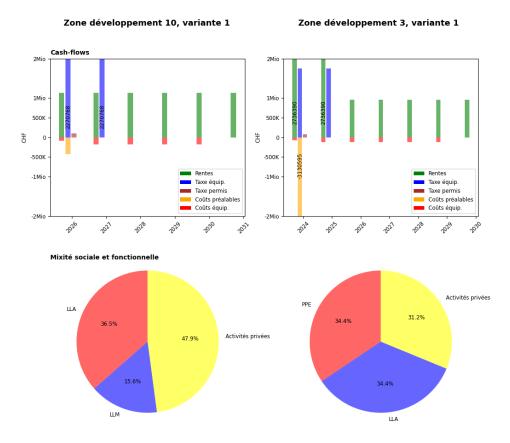


Perimètre PA, v	ariante 1	Perimètre PA, va	ariante 2		
nnique				Diff.	
Surface terrain	89061 m²	Surface terrain	89061 m²		0.0
Surface bâtie	33598 m²	Surface bâtie	31568 m²		-2030.0
SP totale	161740 m ²	SP totale	148969 m ²		-12771.0
SPd totale	137916 m ²	SPd totale	127061 m ²		-10855.0
SN totale	137227 m²	SN totale	126372 m ²		-10855.0
IUS	1.55	IUS	1.43		-0.12
IUS PA	1.59	IUS PA	1.59		0.0
Nombre logements	993	Nombre logements	956		-37.0
Nombre habitants	2979	Nombre habitants	2868		-111.0
Volume bâti total	529329 m³	Volume bâti total	488370 m³		-40959.0
Volume déblais	57697 m³	Volume déblais	55657 m³		-2040.0
Volume remblais	412 m³	Volume remblais	412 m³		0.0
nces [CHF]				Diff.	
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements	2 457 384 6 176 983 6 522 971 24 696 907	Dépollution Démolition Espaces publics Equipements	2 457 384 6 176 983 6 522 971 24 696 907	Jiii.	0.0 0.0 0.0 0.0
Dépollution Démolition Espaces publics	6 176 983 6 522 971	Démolition Espaces publics	6 176 983 6 522 971	5	0.0 0.0 0.0 -6811500.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235	5111	0.0 0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const.	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const.	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626	2	0.0 0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235	2	0.0 0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const.	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const.	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626	Diff.	0.0 0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const.	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626		0.0 0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862		0.0 0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0 -3332.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862		0.0 0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0 -3332.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter ronnement/Energie	6 176 983 6 522 971 24 696 997 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862		0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0 -3332.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter ronnement/Energie Ath AE Facteur d'enveloppe	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194 158781 m ² 137916 m ²	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter Ath AE Facteur d'enveloppe	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862		0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0 -3332.0 -7026.0 -10855.0 0.04
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter ronnement/Energie Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194 158781 m ² 137916 m ² 1.15 9136 m ³	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862 151755 m ² 127061 m ² 1.19 9044 m ³		-7026.0 -0.04-092.0 -7026.0 -0.04-092.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter ronnement/Energie Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker Mise en décharge	6 176 983 6 522 971 24 696 997 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194 158781 m ² 137916 m ² 115 9136 m ³ 48561 m ³	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker Mise en décharge	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862 151755 m² 127061 m² 1.19 9044 m³ 46613 m³		0.0 0.0 -6811500.0 -1465425.0 -33315.0 -3332.0 -7026.0 -10855.0 0.04 -92.0 -1948.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter ronnement/Energie Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker Mise en décharge Terre végétale	6 176 983 6 522 971 24 696 907 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194 158781 m ² 137916 m ² 1.15 9136 m ³ 48561 m ³ 14039 m ³	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker Mise en décharge Terre végétale	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862 151755 m² 127061 m² 1.19 9044 m³ 46613 m³ 14992 m³		-7026.0 -10855.0 -1948.0 -1948.0 -1948.0 -1948.0
Dépollution Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter ronnement/Energie Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker Mise en décharge Terre végétale Surface imperméable	6 176 983 6 522 971 24 696 997 103 179 120 18 618 660 441 941 44 194 158781 m ² 137916 m ² 1.15 9136 m ³ 48561 m ³ 14039 m ³ 60929 m ²	Démolition Espaces publics Equipements Rente DDP Taxe d'équipement Taxe permis const. Taxe permis habiter Ath AE Facteur d'enveloppe Terres à stocker Mise en décharge Terre végétale Surface imperméable	6 176 983 6 522 971 24 696 907 96 367 620 17 153 235 408 626 40 862 151755 m² 127061 m² 1.19 9044 m³ 46613 m³ 14992 m³ 58899 m²		-7026.0 -19855.0 -1948.0 -33315.0 -33315.0 -33315.0 -7026.0 -10855.0 0.04 -92.0 -1948.0 953.0

Ici une comparaison entre deux variantes effectuées sur le périmètre entier. Pour la deuxième, la géométrie de deux bâtiments a été réduite, le nombre de niveaux a été baissé de un sur quatre bâtiments le long de l'A1, Les délais pour la fin des fouilles archéologiques ont été repoussés et une date de début de travaux a été imposée à janvier 2025 pour la zone de développement n° 6 où se trouve la future école.

On peut constater des différences sur quasiment tous les indicateurs mis à part les coûts de démolition et dépollution ainsi que ceux des équipements et espaces publics où rien n'a été changé. Le diagramme de phasage indique effectivement que la zone de développement n° 6 peut commencer les travaux début 2025 alors que les zones de développement n° 9 et 4 se retrouvent à débuter en 2028 dû aux délais des secteurs de fouilles archéologiques. Le graphique des cash flows montre une légère diminution des rentes et taxes d'équipements perçues étant donné que les SPd ont baissé. Finalement, le diagramme de mixité indique une faible augmentation de tous les types de logements et de l'activité publique au détriment des activités privées.

Ce type de comparaisons peut aussi être réalisé sur les zones de développement ou les lots à savoir que pour ces derniers seul des tableaux de valeurs s'affichent. Il peut également être intéressant de comparer deux zones de développement distinctes afin de voir quelles sont les caractéristiques propres à chacune.



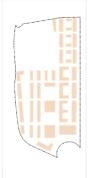
Par exemple ici les types de logements diffèrent (malgré que les couleurs utilisées soient les mêmes), la rente perçue est plus élevée au départ pour la zone n° 3 car elle est composée de logements en PPE ou encore les coûts des travaux préalables (démolition et dépollution) sont beaucoup plus faibles pour la zone n° 10.

B3. Export SméO

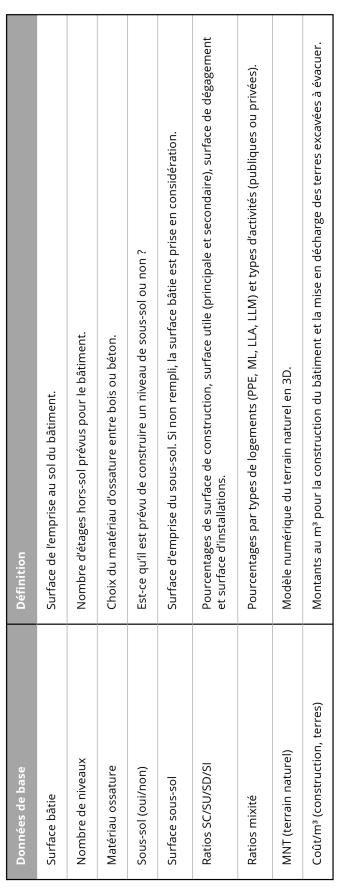
```
<?xml version='1.0' encoding='utf-8'?>
<Export_Smeo>
   <Variante>1</Variante>
   <ST>1537</ST>
   <SB>998</SB>
   <SP>4990</SP>
    <SPd>4240</SPd>
   <VB>16284</VB>
   <Vssol>0</Vssol>
   <NbBat>2</NbBat>
   <IUS_PA>2.93</IUS_PA>
   <AE>4240</AE>
   <Facteur_enveloppe>1.26/Facteur_enveloppe>
   <Batiments>
        <Batiment>
            <Numero>44</Numero>
            <SB>547</SB>
            <SP>2735</SP>
            <SPd>2324</SPd>
            <VB>8922</VB>
            <Vssol>0</Vssol>
            <AE>2324</AE>
            <Facteur_enveloppe>1.21
        </Batiment>
        <Batiment>
            <Numero>43</Numero>
            <SB>451</SB>
            <SP>2255</SP>
            <SPd>1916</SPd>
            <VB>7362</VB>
            <Vssol>0</Vssol>
            <AE>1916</AE>
            <Facteur_enveloppe>1.33</Facteur_enveloppe>
        </Batiment>
   </Batiments>
</Export_Smeo>
```

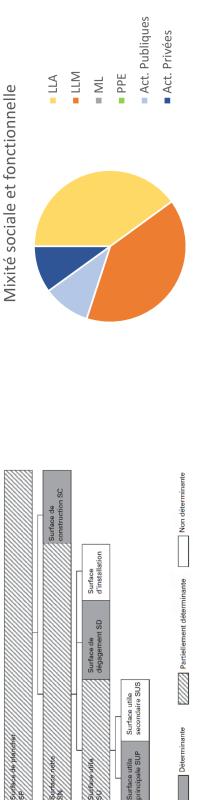
Voici un export XML effectué depuis le simulateur suite au calcul d'une variante sur le lot J (cf. Annexe A). On y retrouve des indicateurs tels que la surface bâtie, la SPd, le volume bâti ou encore le facteur d'enveloppe des bâtiments. Dans la première partie du fichier on retrouve les valeurs totales à l'échelle du lot puis, dans la balise <Batiments>, les valeurs détaillées par bâtiment. Ce fichier est bien sûr conforme à la structure définie dans le fichier XSD qui fait office de modèle. Ces exports XML peuvent être exécutés pour n'importe quelle variante quelle que soit l'entité de base faisant l'objet de la simulation.

C. Indicateurs: méthodes de calcul et choix techniques



Le bâtiment







Le bâtiment

	Indicateurs	Définition	Méthode de calcul	Choix technique
4	SP brute	Surface de plancher brute selon SIA 421.	$S_{ m b ar{a}tie} imes Nbr_{niveaux}$	Tous les étages ont la même emprise.
	SPd	Surface de plancher déterminante selon SIA 421.	SP × (ratio SUP + ratio SC + ratio SD)	Ne connaissant pas la structure finale des bâtiments, l'approximation par des ratios est appliquée.
	NS	Surface de plancher nette selon SIA 421.	$SP - (SP \times ratio\ SC)$	
	Hauteur	Hauteur du bâtiment selon nombre de niveaux et matériau d'ossature.	Gabarits BDM	Reprise de la méthode de calcul du BDM pour définir les hauteurs par niveau en fonction du matériau d'ossature.
	Volume bâti	Volume bâti brut hors-sol selon SIA 421.	$S_{ m batte} imes H_{ m bat.}$	Le bâtiment est un simple rectangle extrudé.
	Volume déblais / remblais	Volumes terre à excaver ou éventuellement remblayer lors des travaux de terrassement.	$\sum_{1}^{n} (Z_{T.N.} - Z_{fond\ fouille}) \times S_{pixel\ MNT}$	Le niveau 0.00 des futurs bâtiments est fixé à l'altitude du T.N. au niveau du centroïde du projet. Surlargeur de 1 mètre autour des bâtiments et profondeur de fouille adaptée en fonction de si un sous-sol est prévu.
	Surface d'enveloppe (Ath)	Somme des surfaces des façades, toiture et sol composant l'enveloppe thermique du bâtiment selon SIA 380.	$(\sum_{1}^{n} L_{façade} \times H) + 2 \times S_{bâtie}$	Le bâtiment est un simple rectangle extrudé.
	Surface de référence énergétique (AE)	Somme des surfaces de plancher situées à l'intérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment selon SIA 380.		Par simplification, utilisation de la SPd.
	Facteur d'enveloppe (Ath/AE)	Rapport entre la surface d'enveloppe et la surface de référence énergétique selon SIA 380.	Ath/AE	

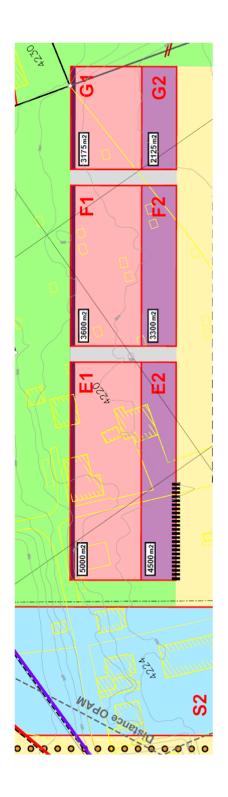
Technique

Energie

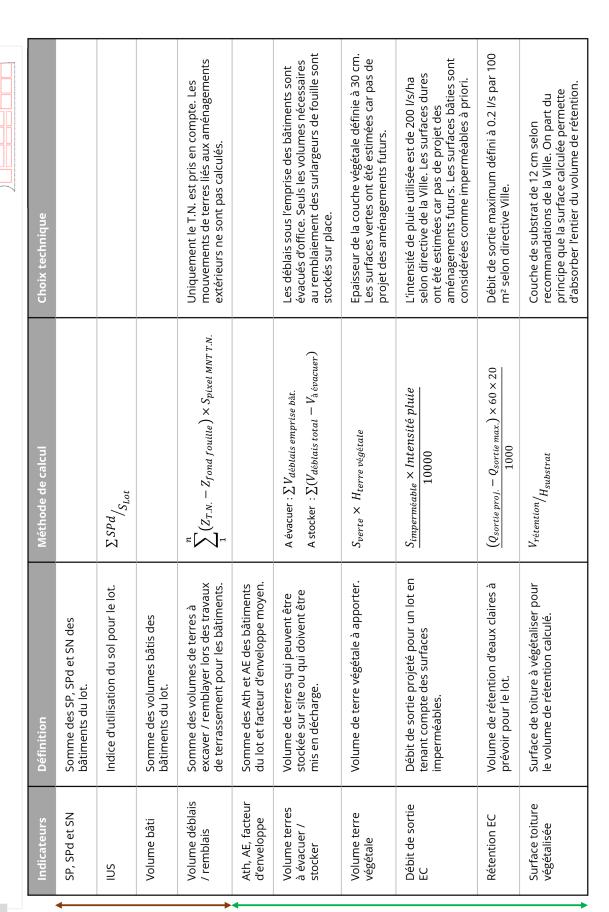
<u>.e lot</u>



Données de base	Définition
SPd max.	Surface de plancher déterminante maximale fixée par le PA.
Bâtiments à démolir (surface, hauteur, coût/m³)	Données de base liées aux bâtiments existants à démolir qui font parties des contraintes.
Terres polluées (surface, profondeur, coût/m³)	Données de base liées aux terres polluées qui font parties des contraintes.
Amén. extérieurs (surface dure/verte + coût/m²)	Données de base liées aux aménagements extérieurs.
+ données de base liées aux bâtiments	



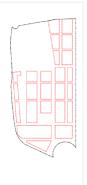




Technique

Energie/environnement



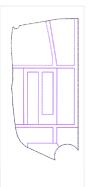


Finances

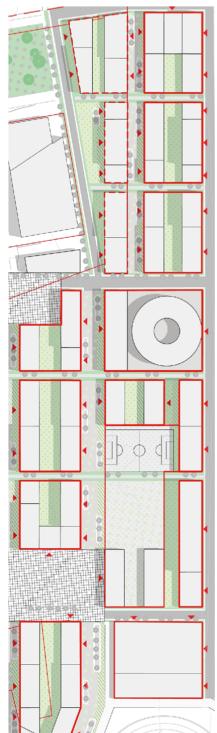
76

Phasage

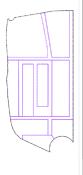
La zone de développement



Données de base	Définition
Date de début des travaux	Une date de début des travaux peut être imposée par l'utilisateur et ainsi définir le phasage de chantier malgré les contraintes et leur délai.
Date de fin des travaux	ldem pour la date de fin des travaux.
Réseaux	
• Type	Type de réseau selon service fourni (EC/EU, eau potable, chauffage, électricité,).
• Coût/m¹	Coût des canalisations au mètre linéaire pour chaque type de réseau.
Espaces publics	
• Type	Type d'espace public selon sa fonction (accès, place, parc, parking, bande végétalisée).
• Coût/m²	Coût des espaces publics au mètre carré pour chaque type.
+ données de base liées aux bâtiments et aux lots	



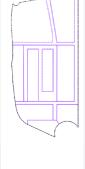
La zone de développement



	Indicateurs	Définition	Méthode de calcul	Choix technique
4	SP, SPd et SN	Somme des SP, SPd et SN des bâtiments de la zone de développement.		
	IUS	Indice d'utilisation du sol pour la zone de développement.	$\sum SPd$ / $S_{Zone\ dev.}$	
	Volume bâti	Somme des volumes bâtis des bâtiments de la zone de développement.		
	Volume déblais / remblais	Somme des volumes de terres à excaver / remblayer lors des travaux de terrassement des bâtiments.	$\sum_{1}^{n} (Z_{T.N.} - Z_{fond\ fouille}) \times S_{pixel\ MNT\ T.N.}$	Uniquement le T.N. est pris en compte. Les mouvements de terres liés aux aménagements extérieurs ne sont pas calculés.
	Volume terres à stocker / évacuer	Volume de terres qui peuvent être stockée sur site ou qui doivent être mis en décharge.	A évacuer : $\sum V_{dar{e}blais}$ emprise bât. A stocker : $\sum (V_{dar{e}blais}$ total $-V_{\dot{a}ar{e}vacuer})$	Les déblais sous l'emprise des bâtiments sont évacués d'office. Seuls les volumes nécessaires au remblaiement des surlargeurs de fouille sont stockés sur place.
	Volume terre végétale	Volume de terre végétale à apporter.	$S_{verte} imes H_{terre}$ végétale	Epaisseur de la couche végétale définie à 30 cm. Les surfaces vertes ont été estimées car pas de projet des aménagements futurs.
	Débit de sortie EC	Débit de sortie projeté pour un lot en tenant compte des surfaces imperméables.	S _{imperméable} × Intensité pluie 10000	L'intensité de pluie utilisée est de 200 l/s/ha selon directive de la Ville. Les surfaces dures ont été estimées car pas de projet des aménagements futurs. Les surfaces bâties sont considérées comme imperméables à priori.
	Rétention EC	Volume de rétention d'eaux claires à prévoir pour le lot.	$\frac{(Q_{sortie\ proj.} - Q_{sortie\ max.}) \times 60 \times 20}{1000}$	Débit de sortie maximum défini à 0.2 l/s par 100 m² selon directive Ville.
	Surface toiture végétalisée	Surface de toiture à végétaliser pour le volume de rétention calculé.	$V_{r\acute{e}tention}/H_{substrat}$	Couche de substrat de 12 cm selon recommandations de la Ville. On part du principe que la surface calculée permette d'absorber l'entier du volume de rétention.

Technique

Energie/environnement



La zone de développement

Indicateurs	Définition	Méthode de calcul	Choix technique
Coûts démolition / dépollution	Coûts engendrés par la démolition des bâtiments existants et à la dépollution des sols.	$S_{b ilde{a}t.} imes H_{b ilde{a}t.} imes Coût/m^3$ $S_{pollu\'ee} imes H_{couche} imes Coût/m^3$	Coût au m³ dépendant de la mise en décharge type B ou E et tenant compte de la main d'oeuvre, du transport et de la taxe de mise en décharge.
Coût gestion des terres	Coût pour l'excavation, l'évacuation et la mise en décharge des terres non polluée.	$V_{ ext{à} epacuer} imes Coût/m^3$	Coût au m³ tenant compte de la main d'oeuvre, du transport et de la taxe de mise en décharge de type A.
Coût des espaces publics	Coût estimé pour les espaces à usage public (parcs, places).	$\sum S_{EP} \times \frac{Coût}{m^2} selon type$	Coût au m² fourni par le BDM sur la base de projets similaires. Coût à charge de la Ville.
Coût des équipements	Coût estimé pour les équipements généraux (accès, parking, bandes végétalisées, réseaux).	$\sum S_{\ell quip.} \times \frac{Coût}{m^2} selon type$	Coût au m² fourni par le BDM sur la base de projets similaires. Coût à charge des lots via une taxe d'équipement.
Rente DDP	Montant de la rente unique pour le DDP selon les valeurs foncières du BDM.	$(SPd_{ML/PPE} \times VF_{ML/PPE}) + (SPd_{LLA} \times VF_{LLA}) + (SPd_{LLM} \times VF_{LLM}) + (SPd_{activit\'e} \times VF_{activit\'e})$	Il s'agit là des rentes uniques. Les montants annuels ont également été calculés et se montent à 5% de cette valeur.
Taxe d'équipement	Taxe de participation pour les équipements généraux (espaces publics, réseaux, parking).	$Taxe_{\'equipement} imes \sum SPd$	Taxe d'équipement de 135CHF/m² SPd fournie par le BDM.
Taxes permis de construire et d'habiter	Taxes prélevées respectivement lors de la délivraison du permis de construire et du permis d'habiter.	Coût $c_{construction} imes 13\%$ o $Taxe_{permis\ constr.} imes 10\%$	Formules reprisent du règlement communal sur les taxes et émoluments perçus par la Ville du 27.05.2010
Dates phasage	Date début des travaux et date fin des travaux	$Date_{fin\ travaux}=Datedibut\ travaux+3\ ans$	Date de début des travaux peut être définie par l'utilisateur selon un planning intentionnel ou calculée automatiquement en prenant le délai maximum des contraintes qui impactent le lot.

Phasage Second

Le périmètre du PA



Données de base	Définition
Valeurs foncières (CHF/m² SPd)	Valeurs foncières définies par la Ville de Lausanne pour le calcul de la rente DDP en fonction du type de logement/activité.
Valeur de la taxe d'équipement	Montant au m² prélevé aux investisseurs/MO, lors de la délivraison du permis de construire, pour la participation aux frais d'équipements généraux et espaces publics.
+ données de base liées aux bâtiments, lots et zones de développement	

Indicateurs	Définition	Méthode de calcul	Choix technique
Nombre de logements	Nombre total de logements estimé pour le futur quartier.	Σ SPd logement $^{\prime}$ $^{\prime}$ 80 m $^{^{2}}$	Utilisation de la SPd totale multipliée par les ratios de type de logements (ML/PPE, LLA, LLM) pour obtenir la SPd totale attribuée au logement. Puis division par une surface de 80m² définie pour un logement moyen.
Nombre d'habitants	Nombre d'habitants total estimé pour le futur quartier.	Nombre _{logement} × 3	Utilisation d'un nombre moyen de 3 habitants par logement.
Le reste des indicateurs sont les mêmes que	s sont les mêmes que pour les zones de	pour les zones de développement et selon les mêmes méthodes de calcul.	s méthodes de calcul.

D. Fichiers numériques

Ci-dessous, la liste des fichiers numériques fournis et nécessaires au fonctionnement de l'outil. Ces fichiers sont contenus dans le dossier compressé *Simulateur_DevImmo.zip* et ses différents sous-dossiers.

01 Installations

- Installateur windows pour Texlive *install-tl-windows.exe* nécessaire à la génération des rapports PDF.
- Installateur windows pour PostgreSQL postgresql-15.3-2-windows-x64.exe.
- Installateur windows pour PostGIS postgis-bundle-pg15x64-setup-3.3.3-1.exe

02 BD

- Fichier de sauvegarde de la base de données contenant la maquette Devimmo.sql
- Fichier de sauvegarde de la base de données des résultats Devimmo_result.sql

03_Plugin

- Fichier ZIP contenant tous les fichiers nécessaires au fonctionnement du plugin QGIS.
 - Simulateur_Dev_Immo.py
 - recuperation_donnees.py
 - calcul_indicateurs.py
 - comparaison_variantes.py
 - animation_temporelle.py
 - export_smeo.py

04_Simulateur

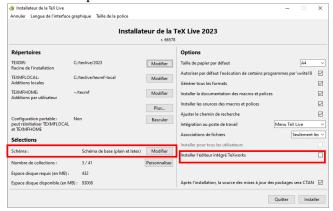
- Projet QGIS avec la maquette des Prés-de-Vidy Developpement_immobilier.qgz
- Modèle numérique de terrain nécessaire aux calculs des mouvements de terre MNT.tif
- Dossier *LaTeX* contenant les templates LaTeX.
- Dossier *Rapports* pour le stockage des futurs rapports générés.
- Dossier Export_Smeo contenant le schéma XSD et servant au stockage des fichiers XML.

Les dossiers et fichiers contenus dans ce dossier ne doivent pas être séparés ni déplacés.

E. Marche à suivre pour l'installation

Installations des logiciels

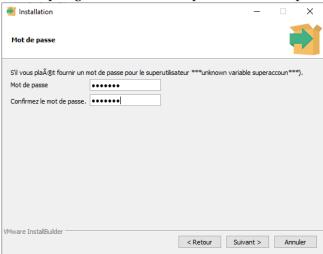
- Texlive:
 - 1. Lancer le fichier .exe
 - 2. Accéder aux paramètres avancés et choisir l'installation de base et décocher TexWorks.



- 3. Sinon cliquer sur suivant partout
- 4. A la fin, exécuter la commande suivante dans un terminal pour installer les packages nécessaires à la génération des rapports :

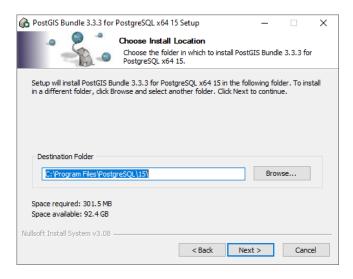
tlmgr install inputenc fontenc babel babel-french geometry fourier utopia fancyhdr graphicx tikz pgfplots multicol float pgf-pie colortbl pgfgantt

- PostgreSQL:
 - 1. Lancer le fichier .exe
 - 2. Entrer "postgis" comme mot de passe et laisser le port 5432 par défaut sur la page suivante.



3. Sinon cliquer sur suivant partout

- PostGIS:
 - 1. Lancer le fichier .exe
 - 2. Choisir le même dossier d'installation que celui de PostgreSQL. Par défaut *C :/Program Files/PostgreSQL/15/*.



- 3. A la fin cliquer sur "Oui" dans les boîtes de dialogue qui apparaissent.
- QGIS si celui-ci n'est pas déjà installé. La version utilisée dans le cadre de ce travail est la 3.30.1.

Création et restauration des bases de données

1. Création des bases de données vides avant de pouvoir les restaurer avec le fichier de sauvegarde. Pour cela, ouvrir un terminal et exécuter les commandes suivantes :

```
createdb -U postgres Developpement_immobilier
createdb -U postgres Developpement_immobilier_resultats
```

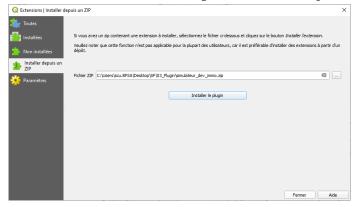
A chaque fois entrer le mot de passe "postgis".

2. Restauration des données à partir des fichiers de sauvegarde. Pour cela exécuter les commandes suivantes à partir du dossier *02_BD* :

```
pg_restore -U postgres -h localhost -d Developpement_immobilier Devimmo.sql
pg_restore -U postgres -h localhost -d Developpement_immobilier_resultats Devimmo_result.sql
A chaque fois entrer le mot de passe "postgis".
```

Installation du plugin QGIS

- $1. \ \ Ouvrir \ le \ projet \ QGIS \ \textit{Developpement_immobilier.qgz} \ dans \ le \ dossier \ \textit{04_Simulateur}.$
- 2. Aller dans Extensions/Installer gérer les extensions puis dans Installer depuis un ZIP



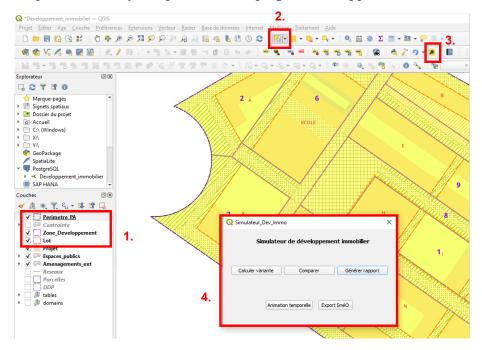
- 3. Installer le plugin à partir du fichier ZIP simulateur_dev_immo.zip.
- 4. Il ce peut qu'il apparaisse des messages d'erreur python car des librairies comme *pylatex* ou *rasterio* peuvent manquer. Dans ce cas, ouvrir la console python de QGIS et exécuter les commandes suivantes autant de fois que le nombre de packages à installer :

import os
os.system('python -m pip install nom_de_la_librairie')

5. Réactiver le plugin et une fois qu'il n'y a plus d'erreur une icône jaune avec une prise devrait apparaître dans les boîtes à outils en haut de l'écran.

Utilisation du simulateur

- 1. Définir une couche active (en cliquant dessus), dans la table des matières QGIS (Lot, Zone_Developpement ou Perimetre_PA) sur laquelle on souhaite effectuer une simulation.
- 2. Sélectionner une entité de cette couche dans la carte avec l'outil de sélection.
- 3. Cliquer sur l'icône jaune pour activer le plugin et faire apparaître son interface utilisateur.



- 4. Commencer par calculer une variante en lui attribuant un numéro. Puis, à partir de là, on peut générer un rapport PDF ou exporter un fichier XML structuré pour SméO. Si l'entité simulée est le périmètre du PA, l'animation temporelle peut également être activée.
- 5. Après cette première variante, on peut réaliser des modifications dans la carte (géométriques et attributaires) quelle que soit la couche à l'aide des outils d'édition de QGIS. Voici la documentation aidant à ce sujet : https://docs.agis.org/testing/en/docs/user_manual/working_with_vector/editing_geometry_attributes.html. Une fois les modifications effectuées, une deuxième variante peut être calculée puis le bouton "comparer" permet d'afficher la comparaison graphique et numérique.