

Master en architecture EPFL / étudiant Johann Gattoni / Enoncé théorique / janvier 2015

Prof. Emmanuel Rey
Prof. Marilynne Andersen

Assistante :
Sophie Lufkin

Sommaire

1. Introduction.....	04
2. Problématique.....	06
2.1 Le gaspillage : une économie et des modes de vie linéaire.....	06
2.2 D'une écologie industrielle à une écologie résidentielle ?.....	08
Principes et généralités	
Quel type de flux pour le résidentiel ?	
2.3 Le potentiel de la biomasse en Suisse.....	10
Une ressource écologique...	
...et multi-usage	
Perspective énergétique 2050 et stratégie biomasse suisse	
2.4 Hypothèse de travail.....	14
3. Méthodologie.....	16
3.1 Données et ordres de grandeur: les limites de la recherche.....	16
Des études globales suisses	
Des études limitées sur les résidus de culture	
Une approche par extrapolation et par case studies	
3.2. La surface productive: construction d'un métabolisme résidentiel.....	18
Un type de modèle qualitatif, quantitatif et évolutif	
Application à un site: Yverdon	
4. Les flux de biomasse en Suisse.....	22
4.1 Les flux de biomasse en Suisse.....	22
Une image globale	
Agriculture	
Traitement des déchets	
4.2 Vers un métabolisme local ?.....	28
5. Variation de proximité.....	31
5.1 Digestion anaérobie et fermentation: pistes de valorisation.....	32
Principes et généralités	
Valorisation du biogaz	
Potentiel énergétique et valorisation matérielle	
Rudologie: petit catalogue	

5.2 Intensifier les flux: le métabolisme résidentiel au sein des flux de biomasse suisse.....	43
Intégration d'un programme : serres agricoles	
Le rendement en serre	
Les résidus de récolte	
Serres et habitat : plusieurs visions de dimensionnement	
6. Étude de cas.....	52
6.1 De Zonneterp et les cinq cycles.....	55
Système de chauffage	
Le cycle de l'eau	
Le cycle du carbone et des nutriments	
6.2 Hammarby Sjöstad: l'importance de la conception.....	63
Transport	
Forme urbaine	
Architecture du paysage	
Consommation en énergie	
Sources d'énergie et gestion des déchets	
6.3 Serre hydroponique Agroscope à Conthey: le travail en serre.....	71
Les entretiens	
Visite des locaux	
Le travail en serre	
7. Application sur le site d'Yverdon.....	77
7.1 Introduction au site.....	77
La correction des eaux	
Yverdon et son territoire	
Yverdon demain: le PDL gare-lac	
7.2 Modèle théorique et ouverture vers le projet.....	83
Des flux combinée	
Présentation des échelles d'intervention : le périphérique symbiotique	
7.3 Intention de projet.....	87
8. Conclusion.....	90
Bibliographie.....	92
Annexes.....	96

1. Introduction

Dans un contexte d'urbanisation et de densification toujours plus intenses, les questionnements liés à la ville durable jaillissent au centre des préoccupations. Les thèmes écologiques, économiques et sociaux ambitionnent de converger vers un même objectif, répondre aux besoins actuels tout en préparant le lit d'un futur pérenne.

Parmi les différentes modalités discutées, de nouvelles orientations de recherche émergent. S'inspirant des travaux en écologie industrielle, la notion de ville symbiotique entend optimiser le métabolisme urbain en valorisant ses ressources dissimulées. Outre la réduction des besoins et l'intensification de l'utilisation d'énergies renouvelables, elle planifie en terme de synergies de proximité, d'énergie et de matériaux en analysant précisément le bilan écologique d'un lieu donné. Déchets urbains, rejets de gaz, matériaux de construction... basiquement tout est à considérer comme matière première potentielle.

En s'intéressant plus particulièrement aux flux de biomasse résidentiels, cette recherche propose une image des besoins et résidus issus de la consommation des habitants. Elle développe ensuite une variation en misant sur une localisation partielle de la production agricole et des techniques de traitement des déchets.

Entre production agricole et potentiel énergétique, cette recherche rend attentif aux cycles de biomasse liés à l'habitant et donne à voir une image combinée, ouvrant vers une perspective de projet basée sur une intégration fine des programmes.

2. Problématique

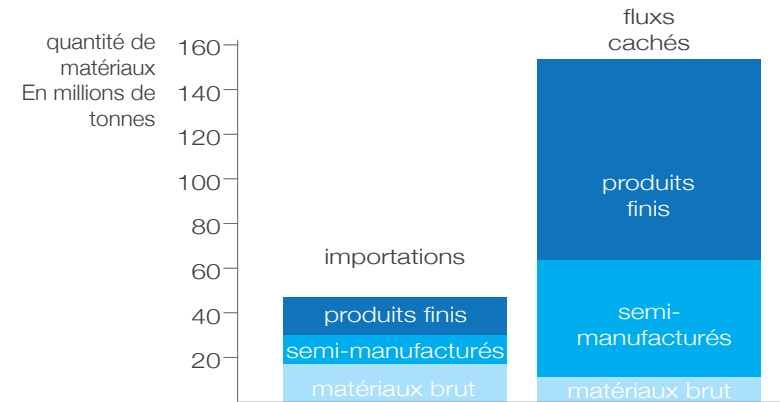


figure 1
flux cachés et finition des produits

1 Brändle et al., 2010 [1], le chapitre 1.3, "pas de rupture de la tendance à la tertiarisation", présente les dynamiques de délocalisation et d'outsourcing de l'économie suisse.

2 Desmarchelier, 2012 [2], le chapitre 1.3, "tertiarisation et découplage écologique, une relation devenue ambiguë", critique la vision d'un découplage des émissions de CO2 et de l'économie basée sur les courbes de Kuznets. L'auteur rappelle que "seuls les polluants à effet local sont pris en compte" et que "les courbes ne représentent pas les stocks (de matière)"

3 Ibid. chapitre 2 et Fussen et al. 2003 [3].

4 [4], l'indice DMI exprime la quantité de matériaux directement utilisée en Suisse. En 2006, il s'élevait à 15 tonnes par habitant. L'indice TMR additionne la totalité des ressources utilisées, y compris les flux cachés et l'extraction indigène non utilisée. En 2006, il s'élevait à 47 tonnes par habitant.

5 [5], p.84. à propos de Métapolis. "Il en résulte que ces habitants (les St-Gallois) nécessitent de grands réservoirs urbains : ils tirent leur approvisionnement d'une région géographique très étendue et ont également besoin d'une vaste région pour la gestion de leur déchets." Suren Erkman

6 [6] à propos des égouts de Gennevilliers à Paris et des fermes de traitement des eaux usées de Berlin, voir (Napawan, 2011)

L'urbanisation croissante et la raréfaction des ressources interrogent nos modes d'approvisionnement. Les villes, prises comme lieux de consommation, concentrent la demande tout en rejetant des déchets. Ce mode de fonctionnement linéaire entraîne des coûts économiques et écologiques importants, tout en masquant et niant leurs effets réels.

2.1 Le gaspillage : une économie et des modes de vie linéaire

Au fil des années, les économies occidentales se sont désindustrialisées.¹ Au jeu des délocalisations, les problèmes de pollution locale se sont écartés mais l'impact écologique global a augmenté.² Ce mode d'approvisionnement, dépendant des coûts de transports, est menacé par l'augmentation du coût du pétrole.

Parallèlement, l'impact écologique de nos sociétés s'est alourdi. Société de consommation, urbanisation et démographie participent de ce constat.³ Mais le gaspillage des ressources liées à nos importations en est également un grand facteur. Pour quinze tonnes de matériaux par année par habitant suisse, 32 tonnes sont perdues à l'étranger.⁴ Autrement dit, pour chaque matériau utilisé en Suisse, plus de deux fois plus sont perdus dans les processus d'extraction à l'étranger.

Cette frénésie dans les importations entraîne une pression sur les ressources toujours plus grande, alors qu'au même moment, à l'autre bout de la chaîne, les villes dépensent des sommes conséquentes pour gérer leurs déchets.⁵ Elles rejettent les nuisances loin des villes, brûlent les déchets ou les enfouissent dans des citernes à l'abri des regards et des odeurs, écartant ainsi des ressources potentiellement réutilisables.

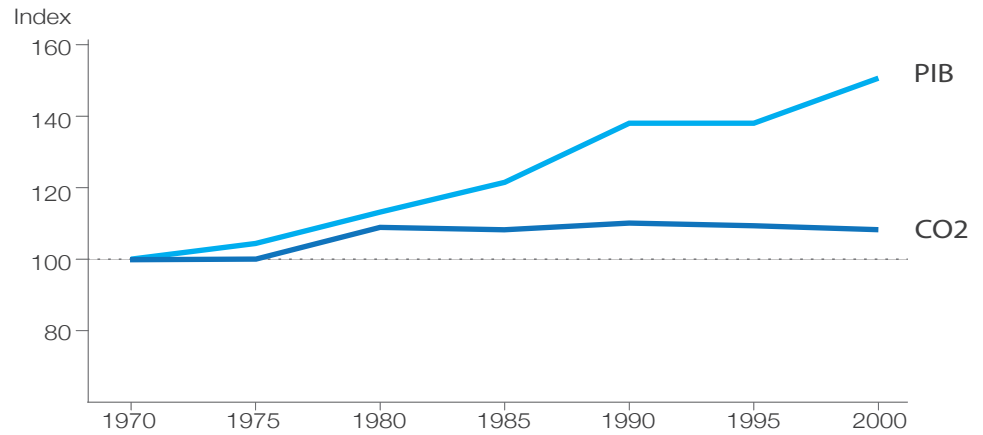


figure 2
 comparaison de l'évolution du PIB avec l'évolution des émissions
 des gaz à effets de serres en Suisse
 indexés à 1970 = 100
 sources : Aufdatierung des BUWAL-Umweltbericht Nr.258,
 Datierung des BUWAL vom 07.11.2003 ; Weltbank 2003

Au XIXe siècle, des villes comme Paris ou Berlin intégraient leur agriculture à leur système d'égouts et de traitements des eaux. Ils produisaient des légumes, fertilisaient des champs peu propice à la culture, tout en réduisant la pollution des bassins versants.⁶ A quel moment ces systèmes intégrés ont-ils fait place à des systèmes mono-fonctionnels, propres mais n'agissant pas en synergie ?

Cet hygiénisme abouti à un désintérêt sur la question et ne stimule pas la recherche de formes d'approvisionnement et de gestion des déchets durables, intégrant la totalité du cycle de vie des matière.

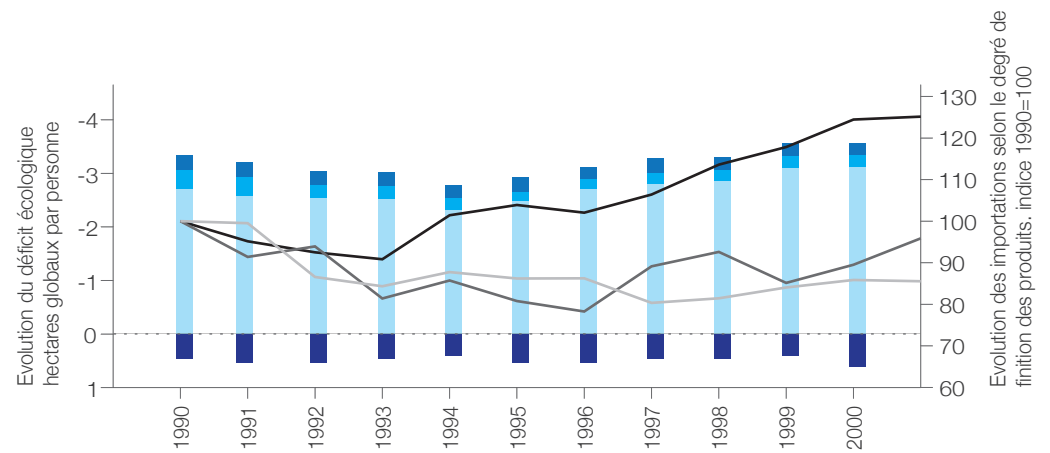


figure 3
 comparaison de l'évolution de l'empreinte écologique avec l'évolution
 des importations en fonction de la finition des produits

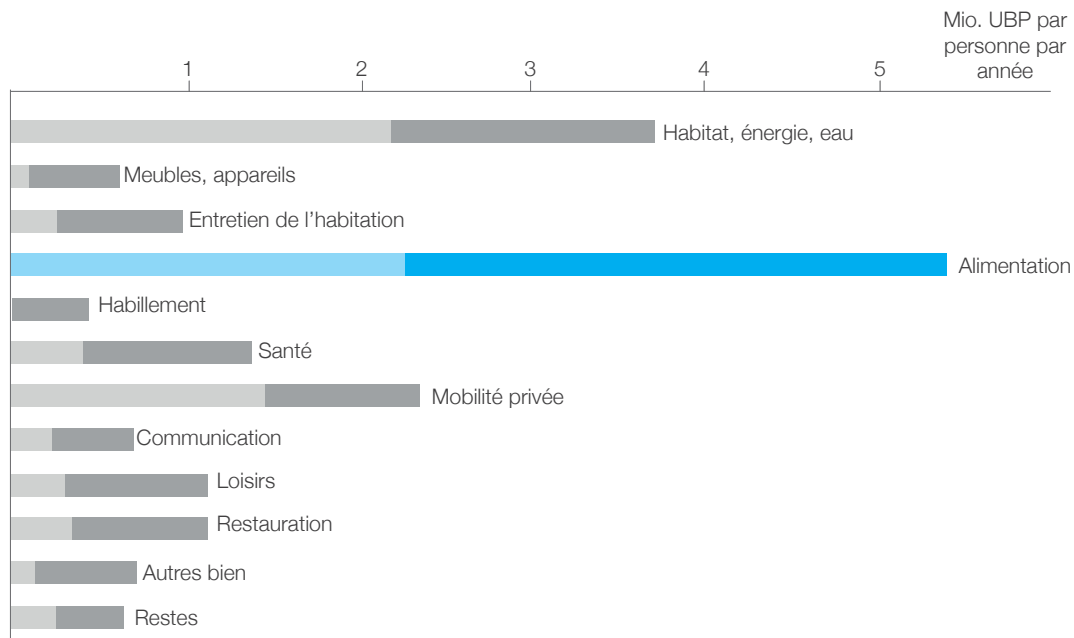


figure 4 : impact écologique de la consommation finale suisse par postes de consommation

■ Impact en Suisse
■ Impact à l'étranger

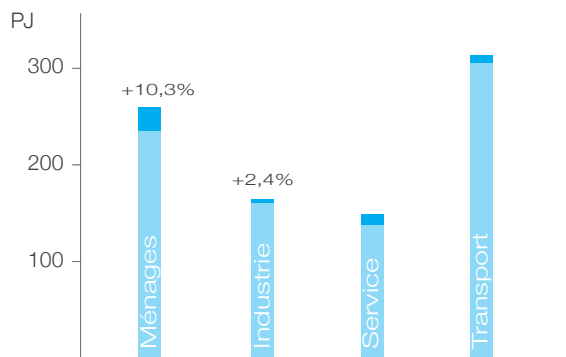


figure 5 : consommation finale d'énergie en Suisse en 2013

1 [7] p.6 définition : mode de développement qui se structure autour de communauté d'entreprises qui coopèrent les unes avec les autres afin de partager efficacement les ressources (informations, matière, eau, énergie, infrastructure et habitat naturel), permettant des gains économiques et environnementaux

2 [8] p.19. dans cette études des potentiels éco-industriels genevois, il est évoqué possibilité de récupérer les sciures de bois pour la construction

3 [9] Abel Wolman propose le terme de métabolisme urbain en 1965

4 [10] "L'analyse effectuée sous l'angle de la demande intérieure finale fait ressortir que les domaines de l'alimentation, du logement et de la mobilité privée représentent à eux trois environ 60 % de la consommation totale de ressources."

5 [11] p.15-16

6 cf annexe 1. calcul d'après [11]

7 [10]

8 voir définition chapitre 2.3

2.2 D'une écologie industrielle à une écologie résidentielle ?

Principes et généralités

Ce constat, l'écologie industrielle l'a fait. Cette science, vise à modeler les flux industriels afin d'optimiser les modes de production en créant des synergies entre les processus.¹ Il en résulte une planification de parcs industriels où les différentes industries fonctionnent en commun, les résidus de l'une devenant la matière première d'une autre. Ces synergies agissent à différents degrés et échelles. Echanges d'énergies ou de matériaux, organisation commune des besoins en logistique, à l'heure de la raréfaction des ressources, les industries misent sur une concentration des moyens.

A l'échelle d'une ville, on étudie la mise en réseaux de différentes industries, et on découvre qu'une scierie peut trouver un intérêt à s'allier à une cimenterie.² Ces nouveaux types de relations, basés sur un impératif d'économie, engagent une autre forme de ville, où les processus industriels sont encore mieux compris et plus transparents, s'intégrant pleinement aux villes.

Ce faisant, elles remettent au goût du jour une conception de la ville vieille de 60 ans : la ville comme métabolisme urbain.³ Mais la question se pose sur la faisabilité de telle entreprise à d'autres éléments urbains. Si les synergies industrielles se justifient presque naturellement, due au brassage de grande quantité de matériaux et d'énergie, quand est-il du résidentiel ?

Quel type de flux pour le résidentiel ?

Par leur nombre, les ménages représentent plus de 60% de la demande finale en matériaux et consomment globalement plus d'énergie que l'industrie en Suisse.⁴

Mais les flux de matières par ménage sont moins importants et plus spécifique. Aujourd'hui, seule une moitié des déchets biogènes ménagers sont collectés, le reste se retrouvant incinérés avec les ordures. De cette collecte, 84% sont compostés⁵, alors que des techniques simples permettraient de les valoriser énergétiquement, sans perdre de nutriments. La composition des déchets ménagers montrent deux postes majeures, le papier/carton et les déchets biogènes. En additionnant la part collectée et la part contenue dans les ordures, un résident suisse rejette 227 kg de déchets biogènes

par année, juste derrière le papier et carton avec 247 kg par année.⁶ De l'autre côté, la consommation alimentaire, avec 28% de la charge écologique totale de la Suisse, est le poste ayant le plus lourd impact écologique, devant l'énergie de consommation et la mobilité privée.⁷

"Toutefois, sachant que la consommation domestique d'énergie représente moins de la moitié de la charge écologique totale, il est également important d'adopter (...) une approche qui ne se limite pas à l'énergie mais englobe l'ensemble des ressources naturelles."

[6] à propos de l'efficacité des ressources suisse

Entre impact écologique à la production et des rejets conséquent, la biomasse⁷ représente le flux de matière majeur des ménages. Réfléchis comme un cycle global, serait-il possible de repenser les flux des ménages, en intégrant les déchets biogènes et autres rejets à un cycle d'approvisionnement global ?

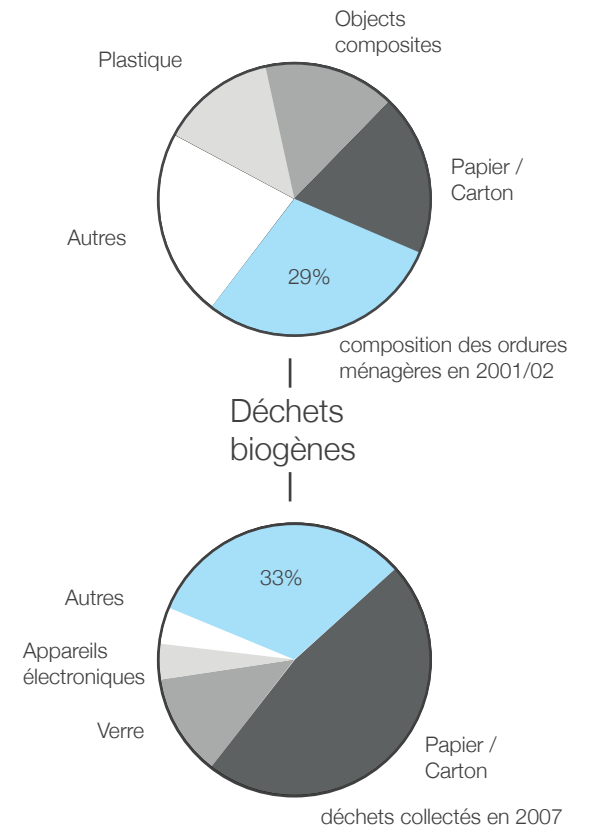


figure 6 : part des déchets biogènes ménagers collectée et part dans les ordures

2.3 Le potentiel de la biomasse en Suisse

Une ressource écologique...

La biomasse est une ressource naturelle. Elle comprend l'ensemble des matériaux organiques d'origine animale, végétale ou fongique. Le bois, les légumes, les déjections humaines ou animales... sont des éléments de ce large ensemble. Contrairement au gaz ou au pétrole, elles ont en commun de ne pas avoir pas été transformées par des processus géologiques.¹ Ce sont donc des matières qui se transforment relativement rapidement.

Chacune de ces transformations fonctionne dans un cycle équilibré, dont l'énergie solaire est le seul apport. Les plantes, par la photosynthèse, transforme cette énergie solaire en éléments organiques. Elles-mêmes sont consommées par des animaux dont les déjection et autres résidus sont dégradées en matière inorganique, recyclant les éléments nutritifs en nourriture pour les plantes.²

On parle d'équilibre au sein d'un écosystème lorsque qu'un ensemble est capable de soutenir toutes les étapes du cycle sans rejets, des apports d'énergie à la consommation de nutriments jusqu'au recyclage des éléments nutritifs.³

Chacune de ces transformations, prise isolément, a un impact positif ou négatif sur la biosphère. Le compostage rejette du CO₂, les déjection animales rejettent du méthane... Malgré tout, ces rejets ne sont pas à considérer au même niveau que ceux dus au pétrole ou au gaz naturel. Le pétrole et le gaz naturel, sources d'énergie confinées et isolées dans les couches géologiques profondes, ne font plus partie des cycles naturels et n'échangent plus avec la biosphère. C'est en les extrayant qu'un déséquilibre se forme.⁴

La biomasse a donc un impact naturellement neutre sur la biosphère, car l'ensemble des transformations équilibre les impact positifs et négatifs, les rejets de l'un devenant la nourriture d'un autre.

...et multi-usage

Parler de cycle est donc particulièrement important dans le cas de la biomasse. Chaque utilisation de matière organique devrait être pensée comme une intervention au sein d'un équilibre global. Nourriture, matériaux de construction, production d'énergie ou bio-carburants, l'utilisation de la biomasse n'est qu'un moment, une étape de son cycle de vie. En effet, l'utilisation en cascade⁵ permet une multitude d'usages, de la produc-

1 définition de bfe.admin.ch, rubrique énergies renouvelables/biomasse

2 [12]

3 ibid.

4 swissenergie.ch, on parle de carbone fossile

5 [13]p.27. "Sa cohésion (de l'écosystème) est assurée par un flux matière-énergie utilisé en cascade. (...)chaque espèce tire énergie et matériaux des molécules organiques d'une ou plusieurs espèces dont elle se nourrit. (...) Tous les matériaux ingérés par une espèce ne sont pas utilisables, la lignine et la cellulose ne sont pas digestibles pour nombre d'herbivores. (...) Un écosystème est finalement une vaste structure dissipative à étapes multiples, sous-structures dissipatives d'espèces tirant chacune leur source de matière-énergie d'autres espèces".

cette notion est reprise dans le domaine énergétique, le potentiel d'utilisation en cascade d'une ressource s'appelle le potentiel exergétique.

tion agricole aux résidus de culture, du petit-lait de fromage servant de nourriture à d'autres animaux, des déjections à l'épandage, les nutriments s'échangent et voyagent d'un état à l'autre. L'incinération, ultime valorisation énergétique, est à considérer comme une destruction de ces éléments, une mise hors de cycle. C'est pourquoi les interventions à des fins énergétiques doivent s'intégrer aux cycles sans les détruire.

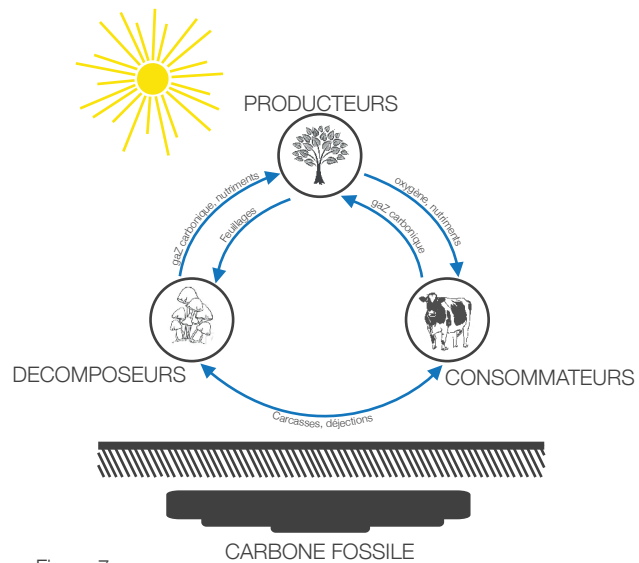
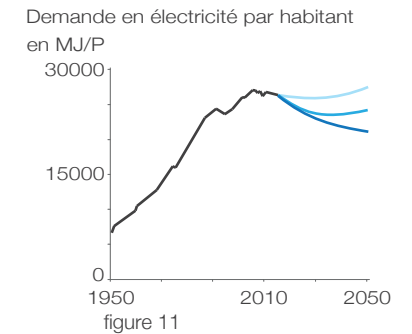
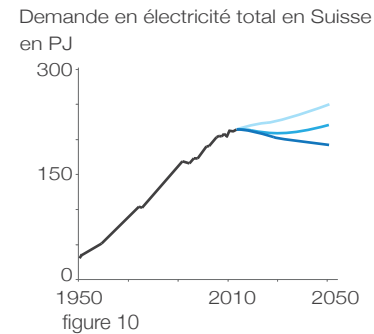
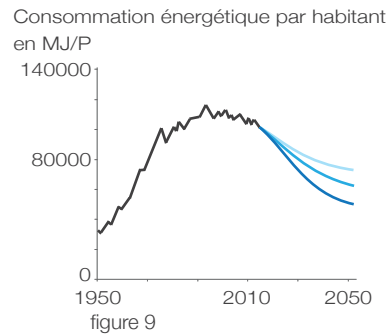
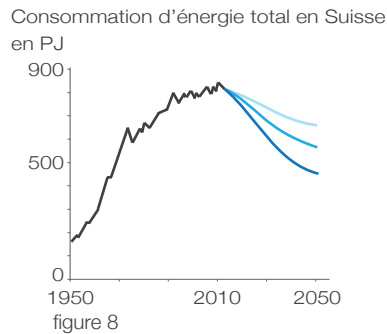


Figure 7.





Perspective énergétique 2050 et stratégie biomasse suisse

En mai 2011, le Conseil fédéral a décidé de renoncer au remplacement des centrales nucléaires. Sur la base de trois scénarios, une stratégie énergétique a été élaborée et projette la situation à l'horizon 2050.¹ Chacun des scénarios prévoit une baisse de la consommation en énergie, où le poids de l'évolution démographique est compensé par une meilleure efficacité énergétique.² Mais l'évolution prévue vers des modes de transports électriques pèse sur la demande en électricité. Si, globalement, une meilleure efficacité dans les équipements compense aussi l'impact de l'évolution démographique, ces nouveaux modes de transports nécessitent un approvisionnement durable.³

La question des sources en énergie alternative est posée et l'utilisation de la biomasse fait partie des mesures stratégiques évaluées. Elle a l'avantage de pouvoir être valorisée de plusieurs manières. Bio-carburant, biogaz ou électricité par cogénération, la biomasse s'intègre à la stratégie énergétique en participant à répondre au besoin en mobilité et en électricité.⁴ Comme la géothermie ou les centrales hydrauliques au fil de l'eau, il s'agit d'une source d'énergie renouvelable stable, permettant une production constante le long de l'année. Elle

s'écarte ainsi des problèmes de pic de production lié aux conditions climatiques.⁵

Aujourd'hui, quatre pour-cent de l'énergie primaire en Suisse est issue de la biomasse, principalement par incinération du bois. On estime le potentiel durablement exploitable entre 7 et 10 pour-cent.⁶ Mais ce potentiel est fortement limité par les caractéristiques du territoire suisse. Entre un taux d'urbanisation élevé et une topographie difficile, les surfaces disponibles à la production de biomasse sont précieuses. La stratégie biomasse suisse fixe donc un ensemble de huit directives pour une utilisation durable de la biomasse et souligne les problématiques liées à la raréfaction des ressources.⁷

"(...)Une utilisation équilibrée du sol doit permettre de s'assurer que l'évolution (énergétique) ne se fait pas au détriment de la production de denrées alimentaires ni des surfaces importantes au plan écologique."

stratégie biomasse suisse, objectif n°2

Ce rappel du conflit entre valorisation énergétique et matérielle caractérise la politique suisse sur la biomasse. L'utilisation du sol est un facteur décisif dans un pays comme la Suisse. Une augmentation des surfaces de plantations énergétiques au détriment des cultures actuelles auraient un impact fort

1 [14]

2 figure 8 et 9 d'après [14]

3 figure 10 et 11 d'après [14]

4 [14], hypothèse nouvelle politique énergétique

5 [15]

6 [16], les valeurs varient en fonction des études

7 [17]

8 [18] et annexe 2

9 [17], point III et Ad III.

10 [16] et [18]

sur les importations.⁸ Les surfaces agricoles garantissant un certain niveau d'autonomie alimentaire et réduisent les coûts et risques sanitaires liés aux importations de denrées alimentaires. La stratégie suisse se focalise donc sur une collecte plus efficace des différents résidus et leur transformation écologique.⁹

Ce conflit énergie-matériaux rejaillit au niveau du traitement des déchets. Aujourd'hui, ces résidus sont principalement compostés ou incinérés.¹⁰ Le compostage permet un retour intégrale des nutriments dans la production agricole mais ne fournit que peu d'énergie. Tandis que l'incinération valorise l'énergie contenue dans la biomasse, mais détruit les nutriments. S'il restera toujours des part que l'on doit brûler, de nouvelles technologies se développent industriellement et permettent une valorisation thermique autant que matérielle.

Entre surfaces limitées et gestion des déchets délicate, la stratégie biomasse suisse s'intercale en reconnaissant ces problèmes. Elle focalise les axes d'optimisation sur une meilleure récolte des différents résidus agricole, ménagers ou boisés, tout en poussant le développement de technologies de gestion des déchets durables.

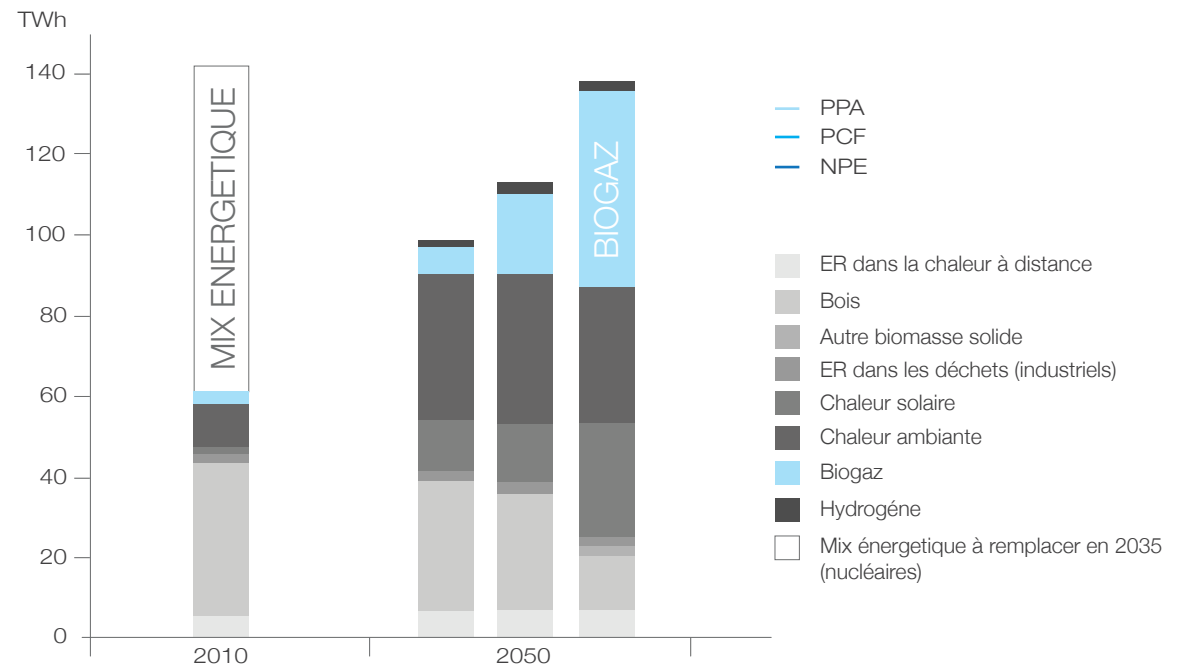


figure 12

potentiel des énergies renouvelables en fonction des scénarios comparaison avec à la quantité du mix énergétique à remplacer

2.4 Hypothèse de travail

Source d'énergie autant que de matière, la biomasse séduit par ses nombreuses possibilités d'utilisation. De l'agriculture à l'industrie du bois, son utilisation par l'homme n'est qu'un moment du cycle des matières. Mais les conflits latents entre utilisation énergétique ou matérielle pèsent sur son potentiel. Les caractéristiques du territoire suisse rendent chaque surface productive précieuse et écartent toute possibilité de culture énergétique durable à grande échelle. La stratégie suisse en matière de biomasse en prend acte et mise sur une valorisation plus efficace des résidus et autres déchets.

C'est dans ce contexte que ce travail propose de s'intéresser aux flux de biomasse liés à l'habitat. Entre impact écologique à la production et des rejets conséquents, la biomasse représente le flux de matière majeure des ménages. S'inspirant des synergies industrielles, ce travail part de l'hypothèse d'une gestion plus efficace en ressource en rapprochant les différents acteurs. De l'alimentation au traitement des déchets, le consommateur s'intègre à un véritable écosystème de matière qu'il faut associer pleinement à la réflexion afin que des pistes de synergies durables puissent être trouvées.

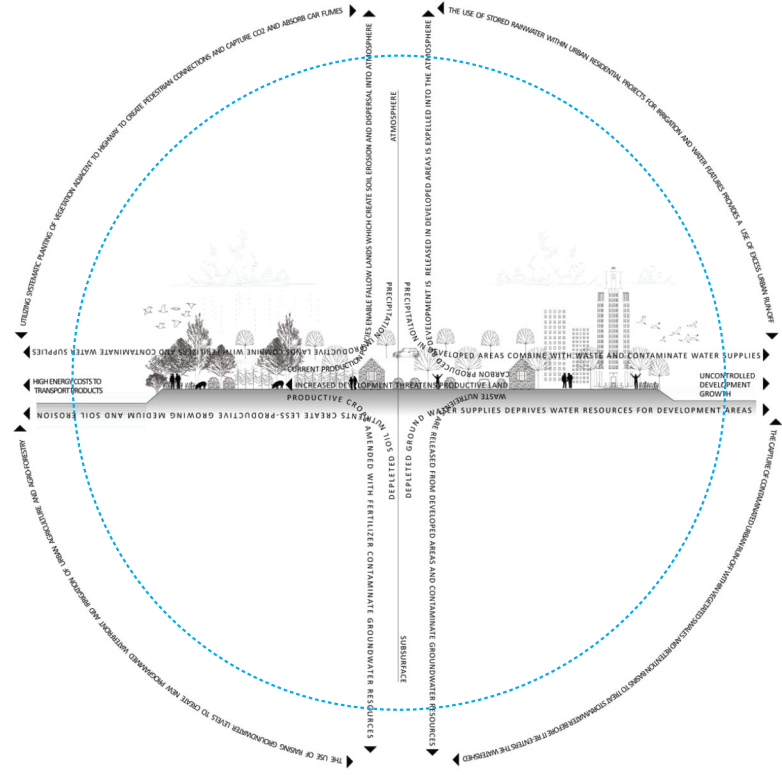
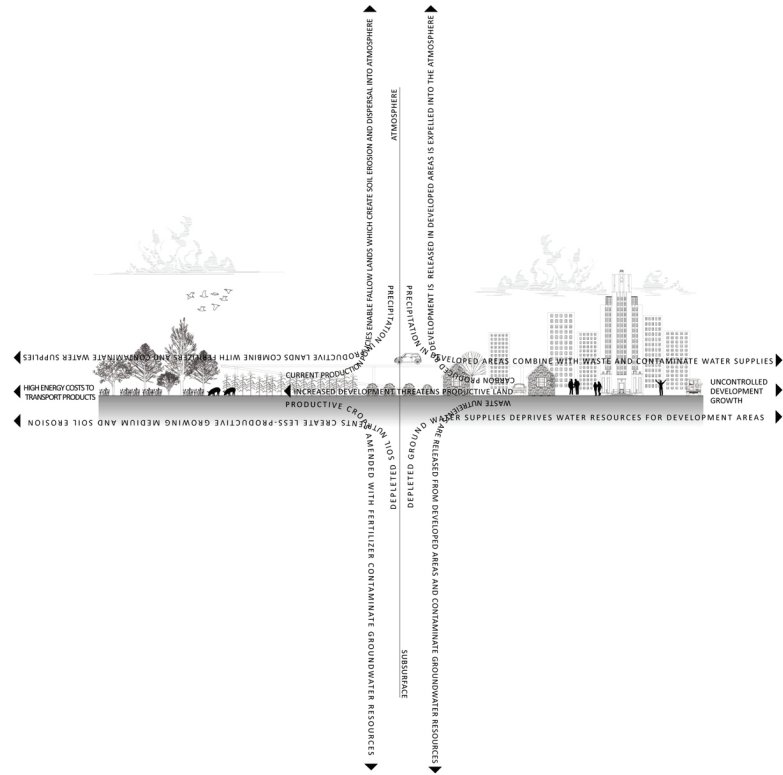


Figure 13. diagrammes de la ville moderne et de la ville durable Flux linéaires contre surfaces multi-productives

d'après [21]

3.Méthodologie

Le thème de cette étude s'éloigne quelque peu du domaine d'expertise de l'architecture. En superposant une nouvelle couche d'interprétation au domaine de l'urbanisme, la gestion des déchets et des cycles de nutriments, cette étude tire vers les limites de compétence de l'architecte. Comment s'imprégner d'un domaine d'ingénierie pour en sortir des principes utiles à l'urbanisme ? La question de la validité des données est traitée ici.

3.1 Données et ordre de grandeur : les limites de la recherche

La biomasse est une source de matière et d'énergie diverse. Sous la même dénomination cohabitent des éléments aussi variés que le bois, les déchets agricoles ou les eaux noires. Cet ensemble varié conserve cependant une certaine unité, dans le sens où il est important de considérer chacun des éléments comme potentiellement transformables.

Il s'agit de matières organiques soumises aux lois écologiques naturelles, qui, sans intervention humaine, retourneraient dans les cycles écologiques naturels.

Il est donc particulièrement important de prendre en considération les flux de matières organiques. Une surface agricole a un certain rendement, produisant une certaine quantité de nourriture et de déchets, qui eux-mêmes peuvent nourrir une certaine quantité d'hommes ou d'animaux qui, finalement, génèrent des résidus valorisables énergétiquement.

Cette recherche théorique fait donc intervenir différents domaines d'études, aux connaissances parfois empiriques ou, au contraire, très normées.

Il est cependant rare que des rapports d'étude soient conduits spécifiquement dans le but d'une meilleure gestion des déchets urbains. Cette recherche théorique recoupe donc des valeurs issues d'études aux objectifs divers. Les valeurs manquantes ou difficiles à estimer ont été obtenues auprès de différents intervenants, sous la forme d'entretiens. Les cas d'études permettent de lier et de confirmer certaines valeurs.

Des études globales suisses

La base de recherche s'est faite sur des données issues de l'administration fédérale suisse. L'office fédérale de l'environnement a publié une étude recensant les flux de biomasse suisse en 2006.¹ Ce rapport, très détaillé, souligne les mêmes interrogations et manquements décrits plus haut. Chaque chapitre, détaille les différents processus sur la base de données statistiques et d'estimations. La qualité de leur recoupement donne à voir un aperçu global des flux de biomasse suisse qui a été ensuite une des sources principale pour d'autres études officielles sur la biomasse en Suisse.

Cette recherche s'est inspirée de la manière dont le rapport communique leur conclusions. Ils présentent tout d'abord, sous la forme d'un diagramme de Sankey, les flux de biomasse globaux au niveau suisse. Quatre groupes y sont déterminés, la production, la transformation, la consommation et le traitement des déchets, qu'ils détaillent ensuite dans des chapitres séparés. Cette approche permet d'appréhender clairement les flux de biomasse et à plusieurs échelles. Ces valeurs sont ensuite rapportées à un habitant-type afin d'estimer des ordres de grandeur permettant l'élaboration d'une variante à plus petite échelle.

Au fil de la recherche ces différents niveaux d'interprétation sont intégrés pour proposer des concepts d'intervention multi-scalaire, allant du territoire, influencé par des considérations d'ordre générales, à des principes de fonctionnement d'un ensemble urbain.

Des études limitées sur les résidus de culture

Une limite de cette recherche concerne la valorisation des résidus de culture. La valorisation des sous-produits de culture est une piste de conciliation, c'est à dire, considérer les déchets agricoles comme source de valorisation énergétique tout en conservant une production alimentaire.

Dans ce sens, puisque la production de résidus de culture change en fonction de l'espèce cultivée, un chapitre est consacré à l'estimation d'une valeur moyenne. Pour cela, des valeurs en kilos de rendement de résidus sont nécessaires.

Malheureusement, les études suisses à ce sujet sont axées sur la valorisation matérielle des sous-produits de culture. C'est à dire que leur objectif est de déterminer la qualité nutritive des différents compost afin de les réutiliser comme engrais.

Le problème se situe au niveau des valeurs considérées. Le centre de recherche Agroscope, à Conthey et Wädenswil, fournit des directives de fumure officielles. Ils présentent sous forme de tableau les quantités de phosphate, nitrate et d'azote que l'on peut attendre du compostage des différents résidus de culture, mais ne fournissent pas le rendement en kilos.

Il est donc pour le moment difficile de comparer le potentiel énergétique d'une espèce par rapport à une autre. Bien que, après discussion avec les auteurs, il soit possible d'évaluer cette quantité en additionnant les valeurs nutritives, cette approche basée sur les études de fumure ne rend pas compte des autres types de résidus compostables que l'agriculture produit, tels que les filets de pain en noix de coco ou les tuteurs en bambou.

Une approche par extrapolation et par cas d'études

Pour parfaire à ce manquement, des études allemandes ont été intégrées. L'Allemagne étant un pays misant beaucoup sur la biomasse, les études conduites y sont en général plus spécifiques et participent d'objectifs de planification urbaine. Bien que le contexte allemand diffère du contexte suisse, elles méritent d'être incluses dans le sens

où elle sont facilement assimilables et proposent un point de vue original sur la question.

La première partie de la recherche consiste principalement en une étude des différentes valeurs nécessaires à la construction d'un métabolisme résidentiel. Les données étant fournies dans des unités diverses, le travail a été de les recouper et de les transformer pour être comparable.

Afin de compléter les valeurs et concepts nécessaires à la construction d'un modèle théorique, trois cas d'études ont été choisis. Les sources proviennent de rapports complets disponibles sur internet, de livres ou de visite.

3.2 La surface productive : construction d'un métabolisme résidentiel

Afin de s'appropriier ces valeurs, le concept de surface productive est proposé. Il s'agit d'une simplification des différents types de surface sous la forme d'indicateurs. L'intérêt est de pouvoir évaluer facilement les différents programmes et donc de les comparer et de les agencer ensemble.

Chacune des surfaces peut être potentiellement superposable et former un prototype productif qui, mis en relation avec d'autres prototypes, permet

¹ [18]

de construire un modèle de métabolisme urbain. Trois niveaux sont proposés dans le concept de surface productive.

Le premier considère les différents types de surfaces prises séparément. Le deuxième les assemble sous la forme de prototype et le dernier les met en relation pour former le métabolisme.

Il s'agit d'une clé de lecture où le dimensionnement final et le programme se fait en lien poussé avec l'analyse urbaine conventionnelle. On peut donc considérer cette recherche comme une couche d'interprétation supplémentaire dans la complexité de l'urbain.

Un type de modèle qualitatif, quantitatif et évolutif

Influencé par les infographies et la structure de l'étude du cabinet Ernst Basler + partner sur les flux de biomasse suisse¹, ce type de modèle permet une vision à différentes échelles et ainsi, d'exprimer plusieurs concepts. Il permet également une vision qualitative des relations entre les éléments tout en formulant les quantités échangées. Il met en avant le fait qu'une ressource peut être utilisée à des fins diverses et traduit ainsi la complexité du système.

Application à un site : Yverdon-les-Bains

Cette recherche n'a pas l'ambition de se substituer aux analyses habituelles. Au contraire, elle se nourrit de ces dernières et prend de la valeur quand confronté à la réalité.

Le site d'Yverdon-les-Bains a été choisi pour son potentiel d'accueil de ce type de système. Situé dans une région agricole, la vallée de l'Orbe, cette petite ville de 28'000 habitants, au passé industriel, s'est détournée du lac de Neuchâtel, coupée par les rails de chemin de fer.

Le quartier gare-lac, tampon entre la gare et le lac, est un quartier aux traces industrielles. Tombé en désuétude, sa position stratégique le rend attractif pour un développement futur permettant de relier la ville aux rives du lac.

La ville d'Yverdon, suite à un concours d'urbanisme, a développé un plan directeur localisé de qualité, posant les bases d'un développement résidentiel et commercial futur, tout en conservant l'identité industrielle du lieu.¹ Il prévoit d'accueillir 3'000 habitants ainsi que 1'500 postes de travail.

Au-delà du potentiel de développement, des problématiques architecturales spécifiques rendent ce site intéressant. Les vues sur le lac, au nord du quartier, entrent en conflit avec les principes du solaire passif. Des baies vitrées afin de bénéficier de vues vers le lac risqueraient d'affaiblir les performances énergétiques des bâtiments.

Entrant dans le cadre de recherche, une usine de méthanisation est en fonctionnement dans la commune voisine de Chavornay et permet d'avoir une vision urbaine élargie.

Ce dixième de ville projeté engage tous les thèmes soulevés dans cette recherche et permet d'étudier, à la petite comme à la grande échelle, les problématiques d'approvisionnement jusqu'à la gestion des déchets.

1 [20]



4. Les flux de biomasse en Suisse

“Le terme de biomasse recouvre en premier lieu les matières végétales non transformées par des processus géologiques (à l'inverse des sources d'énergies fossiles, comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel). Avantage décisif: le recours à la biomasse pour la récupération d'énergie ne libère pas plus de CO2 que la biomasse n'en contenait auparavant. De ce fait, la biomasse est absolument neutre au plan du climat.”

swissenergie.ch

4.1 Les flux de biomasse en Suisse

En 2008, l'office fédéral de l'environnement a publié une étude sur les flux de biomasse suisses.¹ Malgré l'évolution des valeurs depuis lors, elle permet de comprendre les relations entre les différents postes de transformation concernés.

Pour permettre la comparaison, l'intensité des échanges est exprimée en réduisant la matière à sa teneur sèche. (tonne/matière sèche_année) Il s'agit d'une valeur théorique obtenue lorsque l'on retire l'eau d'un produit.² Elle est liée au potentiel énergétique, qui se calcule simplement en appliquant un facteur de conversion selon le type de matière.³

Une image globale

Les flux sont organisés selon quatre grands postes qui eux-mêmes comprennent différents sous-postes. La production alimentaire, la transformation par l'industrie agro-alimentaire, la consommation et le traitement des déchets ne se lient pas de manière linéaire, mais dialoguent au sein d'un métabolisme complexe.

L'agriculture, par exemple, ne produit pas seulement pour l'industrie agro-alimentaire, mais fournit une certaine quantité de sous-produits qui s'acheminent vers des centres de fermentations ou s'échangent avec la production de viande.

Ces échanges ne fonctionnent pas en vase clos. Un phénomène d'échelle intervient avec des flux entrants et sortants correspondant aux importations ou pertes. Chacun des postes s'équilibre ainsi et il est possible de les isoler pour les comprendre plus spécifiquement.

► Figure 14.⁴

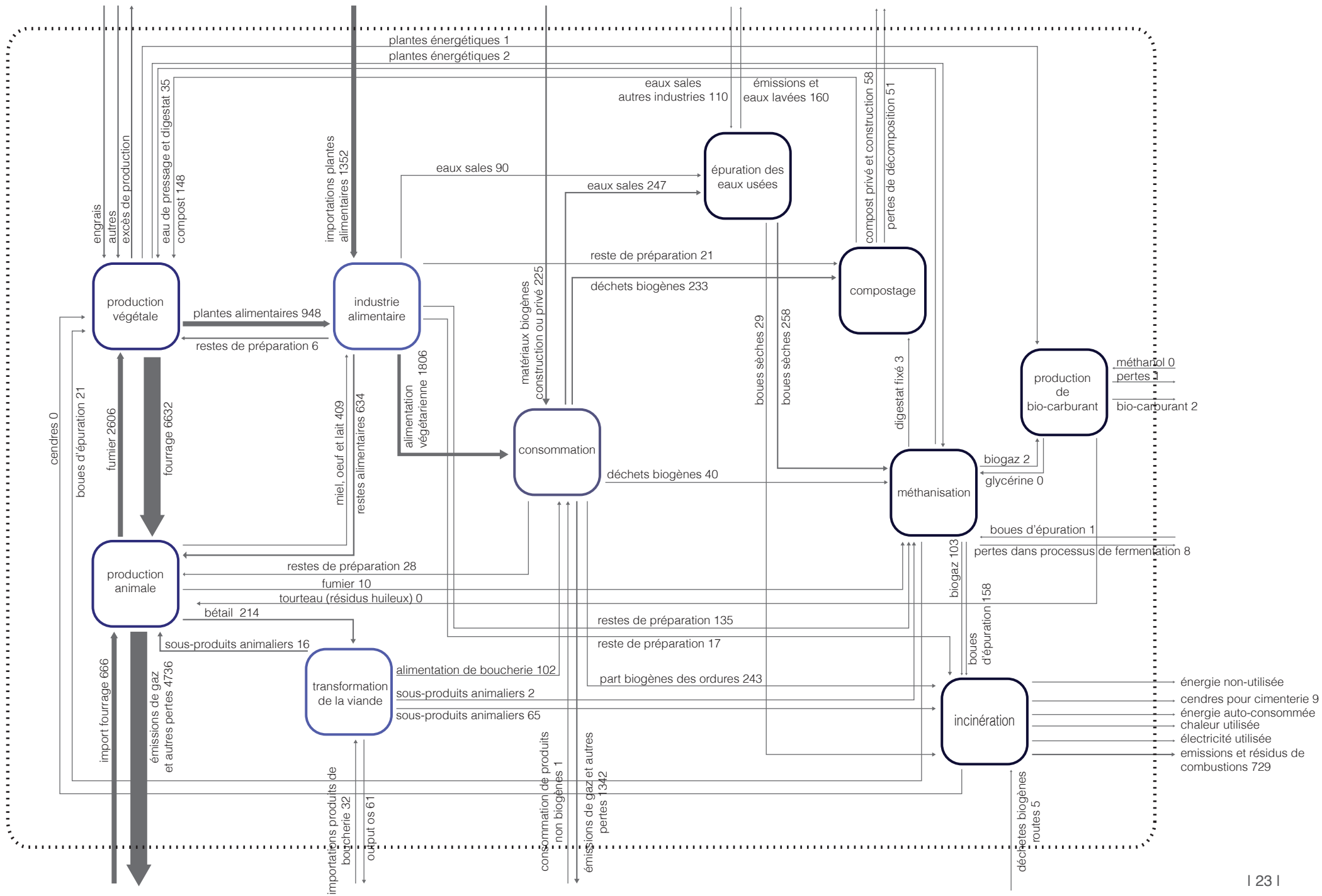
Flux de matière biogène en Suisse en 2006
1000 t_teneur sèche/année
Population suisse 2006 : 7 459 128

1 [19]. elle a ensuite été reprise pour [18]

2 wikipedia

3 voir annexe 3. tiré de [18]

4 redessin d'après [18]



Agriculture

L'agriculture suisse se concentre sur la production de fourrage pour animaux.¹ Sur le territoire, en comparant la qualité de production des sols avec la typologie des cultures, on remarque que le fourrage se cultive sur le plateau, où le sol est de meilleure qualité.²

Il y a donc une grande quantité de matière échangée entre la production végétale et la production animale, rendant ce micro-métabolisme relativement intense. Mais les proportions des quantités de matières arrivant effectivement à la consommation humaine s'inversent, à cause des pertes gazeuses des animaux.³

Avec un taux d'auto-approvisionnement de 45% pour la production végétale et de 94% pour la production animale, la Suisse fait bonne figure, mais doit importer plus de la moitié de sa production végétale.⁴

Loin d'en faire un problème, l'union des paysans suisses (UPS) rappelle l'évolution de la surface de culture fourragères. De 108'500 ha en 1990 à 64'500 ha en 2012, cette perte de 40%, due à des réformes politiques, a entraîné une augmentation des importations de protéines concentrées,

réduisant la qualité des contrôles de traçabilité et augmentant les risques sanitaires. Ils en appellent à une relocalisation de la production fourragère autour des élevages, en critiquant l'éparpillement des infrastructures de stockage et de transformation dédiés.⁵

Besoins en fourrage et importations de végétaux, deux métabolismes se dessinent ainsi autour de ces problématiques. Le premier entre la production végétale et la production animale et le second entre la production végétale et la consommation humaine.

1 figure 14

2 figure 20

3 figure 14

4 <http://www.seco.admin.ch/themen/00513/01238/02638/index.html?lang=fr>

5 [21] et <http://www.uniterre.ch/index.php/fr/dossiers/grandes-cultures-viandes/477-relocaliser-la-production-fourragere>

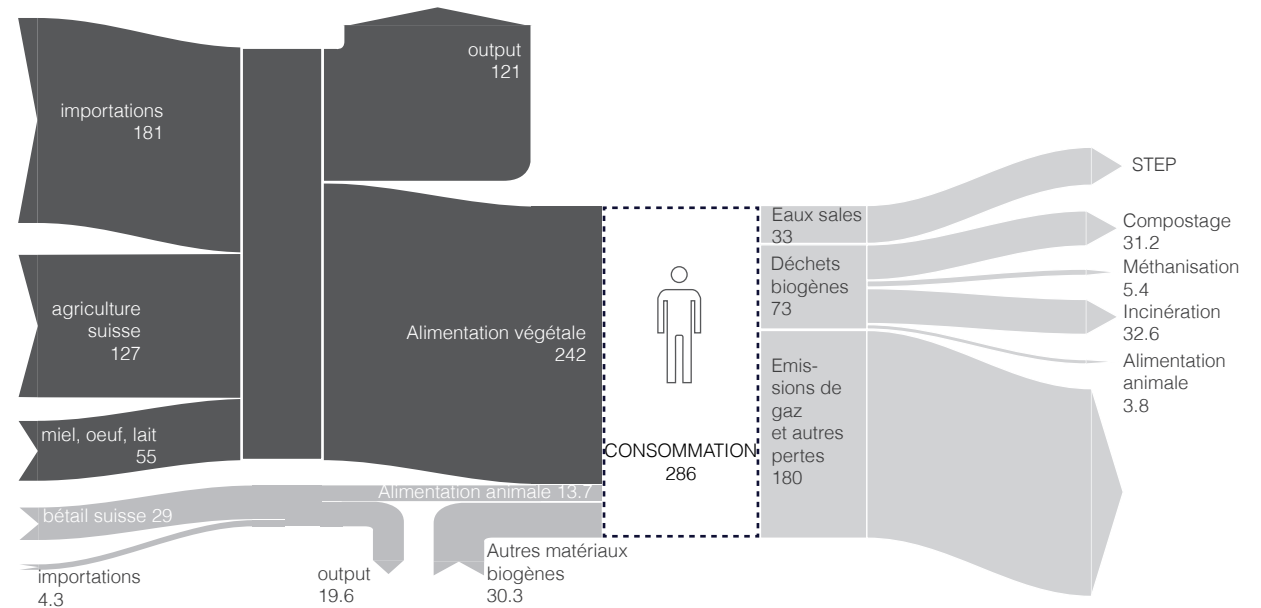
6 [22] Les statistiques varient en fonction des études. Le projet "redémarrer la Suisse" [23] estime les surfaces nécessaires à 1700m² par personne, mais les proportions en légumes sont exagérées. Une étude sur la région baloise [24] approfondit les possibilités dans la réorganisation des surfaces agricoles pour une meilleure efficacité d'approvisionnement. Les valeurs utilisées sont similaires à [22]. C'est pourquoi elles ont été choisies.

►▲Figure 15.

Flux de matière au poste de consommation d'après figure [14]

►Figure 16.

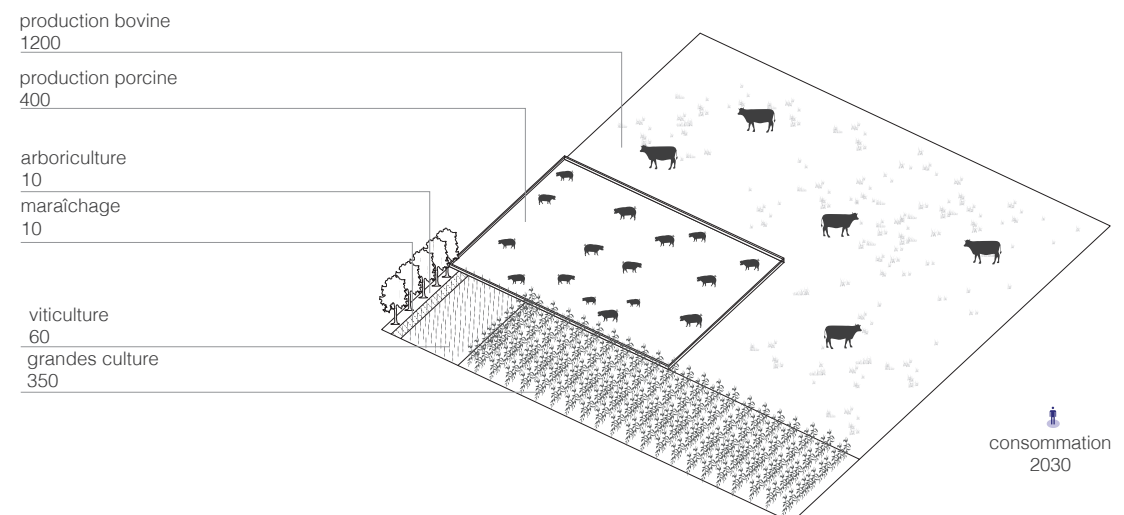
Surfaces nécessaires à la consommation humaine d'après [22]



En isolant le poste de consommation et en le comparant avec les surfaces nécessaires à la consommation en nourriture, on remarque les différences de rendements entre la production végétale et la production animale.

Si, en moyenne, un résident suisse a besoin de 2000 m² pour subvenir à ses besoins, seul 430 m² de surfaces agricoles subviennent à la plus grande part des besoins en alimentation.⁶ L'élevage bovin et porcin nécessitant de large espaces pour la pâture des animaux. Mais cette comparaison ne tient pas compte des nutriments et protéines nécessaires à l'alimentation, dont certains se retrouvent en quantité dans la viande.

Il ne s'agit donc pas de critiquer l'espace dédié aux animaux mais de s'interroger sur la place de l'agriculture en Suisse. Avec une grande quantité de nourriture végétale importée, et une production de nourriture animale en grande part locale, peut-on imaginer rééquilibrer les rapports tout en tenant compte des problèmes sanitaires liés aux importations de fourrage ?



Traitement des déchets

Depuis l'introduction de la LPE en 1980 et l'interdiction de la mise en décharge des déchets, le taux de collecte et de valorisation s'est amélioré. Les usines d'incinération ont réduits leur impact polluants et différentes filières de valorisation se sont développées.¹

En-dehors des stations d'épurations, il existe trois manières de traiter les déchets biogènes en Suisse. La part collectée est compostée ou méthanisée tandis que la part restante est incinérée avec les ordures. Compostage (40%) et incinération (41%), sont les traitements les plus utilisés.²

L'amélioration de la collecte a réduit l'importance de l'incinération. Moins de déchets se retrouvant dans les ordures, une plus grande quantité recyclable doit être traitée. Parallèlement, des processus alternatifs ont été développés. Des usines de méthanisation se sont construites, valorisant toujours plus efficacement les déchets agricoles et ménagers.³

Si le compostage permet de récupérer un maximum de nutriments, l'incinération détruit la matière. La méthanisation (aujourd'hui 5%) est un compostage en milieu anaérobique clos. Elle permet de

récupérer une certaine quantité de biogaz tout en délivrant des résidus utilisables comme engrais.⁴ Méthanisation et compostage permettent le recycler des nutriments. Mais les engrais résultants ne sont pas de même type et ont une utilisation complémentaire dans les cycles de culture agricoles.⁵

Chacune de ces méthodes a ses avantages. En améliorant la collecte, de nouvelles méthodes se sont développées, mais il restera une part dans les ordures valorisée par incinération.

Les objectifs d'utilisation en cascade de la biomasse et les besoins en énergies alternatives rendent la méthanisation attractive. L'amélioration des techniques de cogénération permet de produire énergie et électricité efficacement à partir du biogaz. Ainsi, de nouvelles centrales industrielles, couplant usine de méthanisation et cogénération, fonctionnent depuis le début des années 2000.⁶

Sous l'impulsion de recommandations officielles, Les solutions de traitements de déchets se diversifient et la structure de l'offre évolue vers une meilleure collecte et une valorisation alternative des déchets.

1 Loi sur la protection de l'environnement, LPE, Du 7 octobre 1983. et [26], p.4, "vers plus de valorisation encore", entretien avec Hans-Peter Fahrni, chef de de la division Déchets et matières premières de l'OFEV

2 figure 17, d'après [16], chapitre 3.3.6.1

3 figure 18 et 19. d'après [18]

4 [27], "En moyenne et dans de bonnes conditions, par combustion directe, un kilo de matière organique sèche, sans corps gras, produit 4.65 KWh d'énergie thermique. Ce même kilo, par fermentation anaérobie, fournit environ 280 litres de méthane pur ou 470 litres de biogaz à 60%, soit 2.8 KWh thermique. Pour un produit sec, la combustion aura toujours un rendement plus élevé, mais la biomasse incinérée disparaît. Par la méthanisation, on retire un peu moins d'énergie par le biogaz, mais on récupère de la biomasse sous forme d'humus et d'engrais liquide riche en minéraux, qui retournent aux cultures."

5 [28], "le digestat (...) n'est pas encore un produit stabilisé, il est constitué de matière se trouvant encore en phase de décomposition. (...) comparé à un compost, un digestat est très riche en ammonium, peut-être phytotoxique à haute dose et pauvre en humus stable. Aussi, le digestat doit être utilisé pour son action fertilisante à court terme dans des cultures pouvant employer l'azote minéral disponible. Il doit être incorporé rapidement dans les couches supérieures du sol afin de limiter les pertes ammoniacales."

[29], le digestat peut-être utilisé tel-quel comme décrit par [28] ou valorisé en compost pour une utilisation stable.

6 figure 18 et 19, d'après [18]

Figure 17. traitement des déchets biogènes en Suisse, 2006, tonne_teneur sèche / année

valorisation matérielle

valorisation énergétique

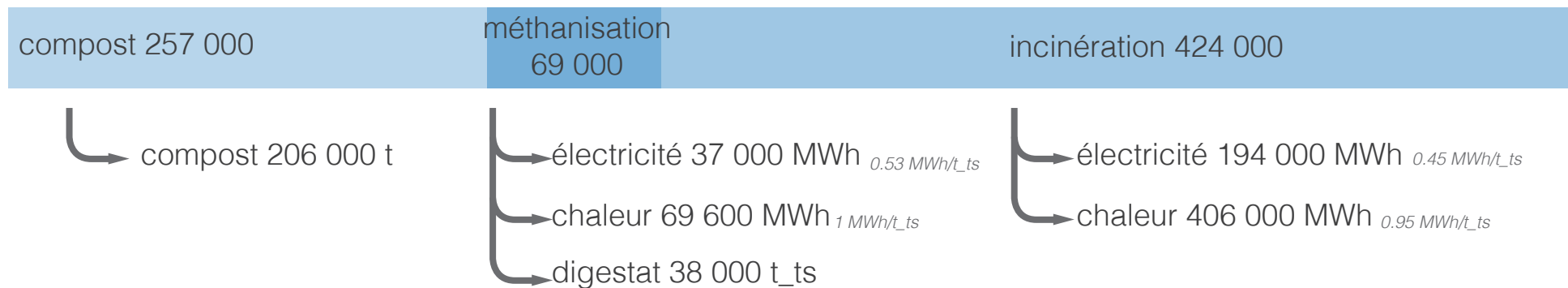


Figure 18.

Unité de méthanisation agricole

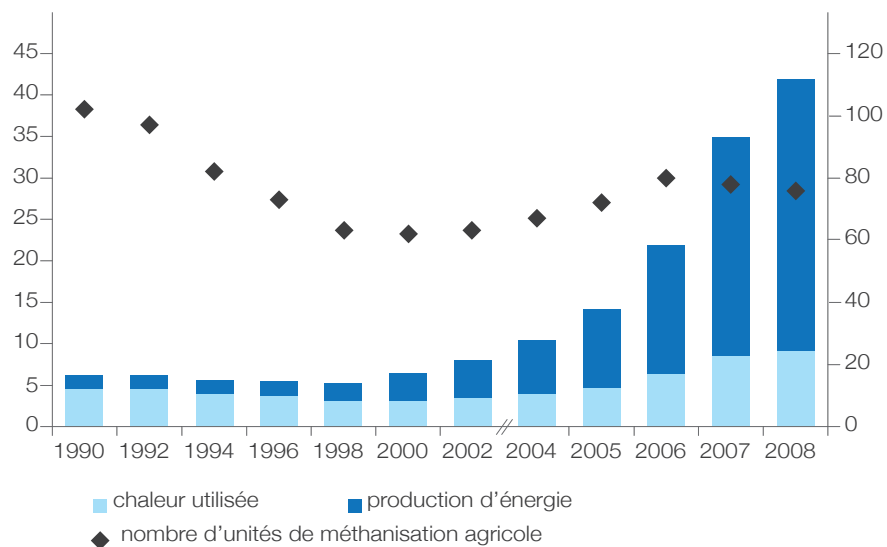
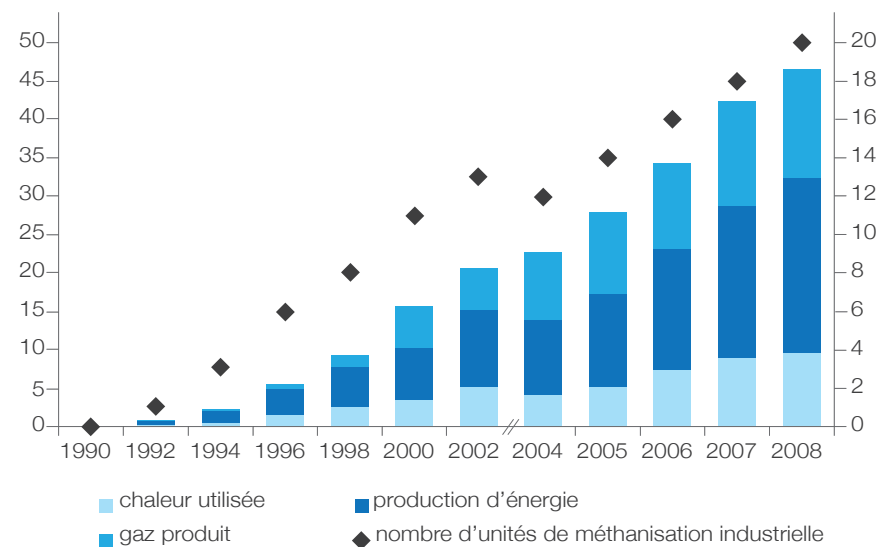


Figure 19.

Unité de méthanisation industrielle



4.2 Vers un métabolisme local ?

Un article scientifique, paru en 2010, donne une estimation du potentiel énergétique de la biomasse en Suisse. Ressource après ressource, les auteurs évaluent ce potentiel en se basant sur des études suisses et internationales.¹

Ils concluent à un potentiel durable de 7% de la demande en énergie suisse, et démarquent les ressources en bois, déchets biogènes et fumier comme étant les plus intéressantes. Il évoquent la compétition entre valorisation matérielle et énergétique comme thème clé d'une stratégie de biomasse durable et citent le potentiel de la méthanisation pour y répondre.²

Leur stratégie d'étude, basée sur une estimation des déchets et autres matières résiduelles ne trouble pas l'équilibre entre agriculture et culture énergétique. Ils intègrent ainsi les recommandations de la stratégie biomasse suisse.³ Mais au regard des quantités de matières biogènes circulant en Suisse, il semble que ces conclusions soient peu avantageuses.⁴

En 1998, une étude autrichienne similaire évalue la contribution de la biomasse à 12% du mix énergétique autrichien.⁵ (Bitterman, 1998). Suite à cela, H.Haberl et S.Geissler ont critiqué le point de vue adopté sur la biomasse. En proposant une définition plus générale de l'énergie, ils réévaluent son potentiel à la hausse :⁶

“The conventional notion of energy use, however, hides much of the real importance of biomass for industrial economies. It includes only the ‘technical’ energy use, i.e. the energy carriers used to produce heat, power and light in machinery, but ignores the energy used for the nutrition of humans and livestock. We may also define socio-economic energy use in a broader sense. If we define the ‘total energy input’ of a society as the sum of all its energy inputs, including food- stuffs and all other uses of energy-rich materials, biomass becomes more important. For example, calculated on this basis, biomass accounted for 37% of the total Austrian energy input in 1990 (Haberl, 1995).”

1 [16]

2 [16] ch. 5.2.5 et 6.

3 [17]

4 [19]

5 [30]

6 [31], H.Haberl collabore à l'Institut interdisciplinaires des Universités autrichiennes
S.Geissler collabore à l'Institut autrichien d'écologie appliquée

7 “En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de mesurer la qualité d'une énergie. C'est la partie utilisable d'un joule.” wikipedia

Daniel Favrat, lors d'une conférence à la radio [32], vulgarise la notion d'exergie : “il s'agit d'une notion à la croisée de trois problématiques contemporaines, la production d'énergie, la préservation du vivant et la théorie de l'information.(...)Elle permet d'évaluer la performance des systèmes de conversion d'énergie. (...) Une bassine d'eau à 40°C n'aurait pas la même capacité au Pôle Nord que sous les Tropiques. Au Pôle Nord, elle se refroidirait trop rapidement et l'énergie utilisée pour la chauffer aurait été moins bien utilisée. (...) Cette notion ouvre un champ vers la température ambiante, vers l'environnement.”
(retranscription libre)

8 <http://www.ecobois-recyclage.ch/gazelsa1.html>

9 [33]

Si les critères proposés pour leur définition de l'énergie peuvent être critiqués, cette citation montre que des points de vue divers sur l'énergie conduisent à des emphases différentes sur le potentiel de la biomasse. En évoquant indirectement le principe d'exergie⁷, incluant la valeur d'usage à la valeur énergétique, Le potentiel de la biomasse est réévalué à la hausse.

Il ne faudrait toutefois pas comprendre cette définition comme une incitation à tout utiliser énergétiquement. Elle vise au contraire à mettre en valeur les possibilités de synergies liées à la biomasse et les économies qui en découlent. En Suisse, les projets d'usines de méthanisation récents évoquent ce potentiel de synergies parmi les avantages.

Le projet GazEL, à Conthey en Valais, est un projet d'usine de méthanisation valorisant les déchets communaux et agricoles. Les résidus sortants, sont prévu d'être utilisés comme engrais de vignes, produisant en retour des résidus agricoles traités par l'usine. Les engrais sortants sont ainsi optimisés en fonction des spécificités agricoles de la région.⁸

A Otelfingen, près de Zurich, des serres agricoles se sont installées à côté d'une usine de méthanisation et réutilisent les effluents liquides comme engrais. Les digestats solides, après déshumidification, sont valorisés en engrais pour l'agriculture locale. La matière est ainsi réutilisée et plusieurs cycles énergétiques sont possibles.⁹

Si ce potentiel global est aujourd'hui difficile à évaluer, une réflexion allant dans ce sens est proposée dans ce travail en se basant sur une réorganisation locale des flux de biomasse autour du résidentiel. Elle prend en compte les flux des nutriments et l'infrastructure nécessaire pour dialoguer durablement avec les flux énergétiques.

- culture céréalière, culture fourragère ++ ; culture sarclée +/++
- culture fourragère +/++ ; grande culture +
- grande culture ; culture fourragère naturelle + ; culture fourragère artificielle +/-
- culture céréalière + ; culture fourragère ++ ; culture sarclée
- culture céréalière, culture fourragère naturelle, pâturage à gros bétail +/-
- culture fourragère + ; culture céréalière +/- ; pâturage à gros bétail ++
- culture fourragère, pâturage à gros bétail +, culture céréalière +/-
- culture fourragère naturelle + ; culture fourragère artificielle, culture céréalière +/-
- culture fourragère naturelle + ; culture fourragère artificielle, culture céréalière +/-
- culture fourragère naturelle + ; culture fourragère artificielle +/-
- pâturage à menu bétail +, culture fourragère, pâturage à jeune bétail +/-
- pâturage à jeune bétail + ; pâturage à gros bétail, culture fourragère naturelle +/-
- pâturage à gros bétail + ; culture fourragère +/-
- pâturage à jeune bétail ++ ; culture fourragère naturelle +
- pâturage à menu bétail ++ ; pâturage à jeune bétail +
- pâturage à menu bétail + ; pâturage à jeune bétail +/-
- pâturage à menu bétail + ; pâturage à jeune bétail +/-
- pâturage à menu bétail +/-
- hors classement

- ✕ usine de valorisation thermique
- △ usine de méthanisation industrielle en service
- ▲ usine de émethanisation industrielle en projet
- usine de méthanisation agricole en service
- usine de méthanisation agricole en projet

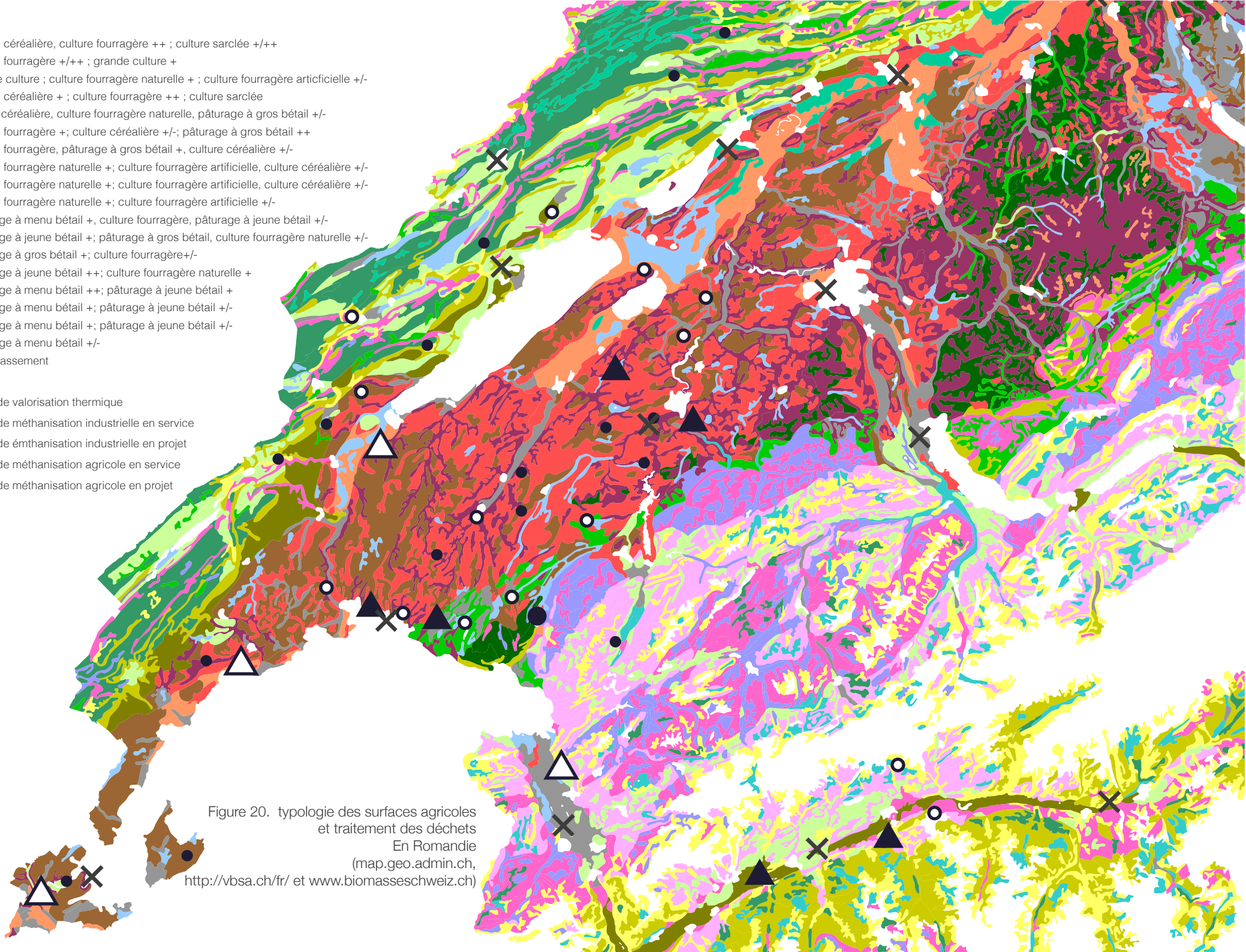


Figure 20. typologie des surfaces agricoles
 et traitement des déchets
 En Romandie
 (map.geo.admin.ch,
<http://vbsa.ch/fr/> et www.biomasseschweiz.ch)

5. Variation de proximité

S'appuyant sur les recommandations des études citées auparavant ce chapitre propose une variation d'un métabolisme résidentiel autour des infrastructures de méthanisation. Les nutriments et le CO₂ issus du processus de traitement des déchets deviennent une matière première permettant de construire des synergies de proximité entre une production agricoles sous serre locale et l'habitat.

Partant du diagramme des flux de biomasse suisse, des valeurs de consommation et de rejets par personne sont estimées. S'il s'agit d'ordres de grandeur, cette méthode permet de tisser des relations entre les différents postes, et de pouvoir estimer les besoins et résidus des programmes afin d'arriver à un certain équilibre au sein d'un métabolisme résidentiel local.

Cet équilibre ne se fait pas forcément au sein d'un même bâtiment. Cette recherche propose une image des besoins et résidus d'une personne, modifiée par la méthanisation et l'utilisation de serre. Si des synergies de proximité sont à trouver par la suite, les infrastructures peuvent se situer dans un territoire proche et s'adresser à l'entier d'une population.

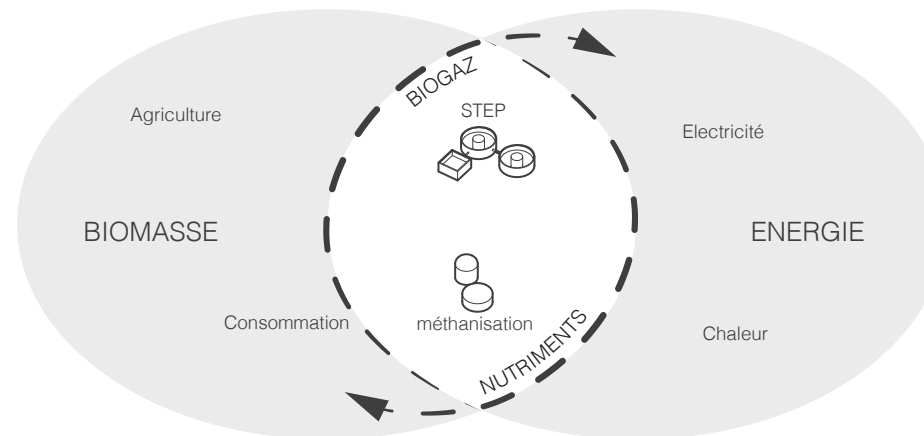


Figure 21.

5.1 Digestion anaérobique et fermentation : pistes de valorisation

Actuellement, 5% des déchets ménagers issus de la consommation sont méthanisés. Le reste étant composté ou incinéré.¹ En se basant sur les recommandations officielles², quel serait l'impact sur le métabolisme résidentiel si les déchets biogènes étaient principalement méthanisés ? Ce chapitre propose une variation du diagramme des flux de biomasse allant dans ce sens. Il donne à voir la quantité d'énergie qu'une personne pourrait produire au sein de ce métabolisme modifié. Ultimement, il permet de discuter la densité d'une construction, en le mettant en lien avec des typologies d'habitat.

Ce changement repose sur une meilleure collecte des déchets biogènes, ainsi que sur l'abandon partiel du compostage au profit de la méthanisation. Il a été estimé que 80% du total des déchets biogènes de consommation pourraient à l'avenir être méthanisés.³

A ce stade, la taille des infrastructures nécessaires n'est pas déterminée. Des fourchette de valeur sont données, et permettent de rester ouvert sur l'intégration de micro-infrastructure au bâtiment ou sur une éventuelle insertion à un centrale existante sur le site d'étude.

Principes et généralités

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus biologique de décomposition des matières organiques se déroulant en l'absence d'oxygène. Des bactéries dégradent les différentes protéines, sucres et graisses dans un processus à trois phases au bout duquel est formé le biogaz⁴. Il est composé en moyenne de 60% de méthane (CH₄) et de 40% de gaz carbonique (CO₂). Outre le gaz, des résidus solides et liquides sont produits et peuvent être valorisés en compost.⁵ Selon la quantité de déchets introduits, le méthaniseur nécessite une cuve de stockage de biogaz.

Selon le degré de solidité et la provenance des déchets, la méthanisation se fait par fermentation en STEP ou dans un digesteur dédié. Environ 85% des STEP en Suisse sont aujourd'hui équipées de fermenteur⁶, pour une production de 121 GWh d'électricité et de 250 GWh d'énergie thermique⁷.

Si la législation permet la co-fermentation de certains résidus agricoles en STEP, elle reconnaît aujourd'hui les problèmes sanitaires qui empêchent la réutilisation des nutriments et se dirige vers une interdiction du mélange des eaux noires avec les résidus agricoles.⁸

1 [16] ch. 3.3.6.1

2 [17]

3 [16] ch. 3.3.6.1

4 [27] et figures 25 et 26

5 ibid.

6 [16] ch. 3.3.7.2

7 [34]

8 [35] le projet de révision totale de l'ordonnance sur la gestion des déchets fixe les types de déchets admissibles en co-digestion dans les STEP. De manière générale, seule les produits potentiellement pollués sont admis.

9 figure 18, 19 et kompogaz.ch

10 [34]

11 figures 27 et 28

12 [36] "le rendement énergétique d'un digesteur anaérobique dépend des matières premières qui l'alimentent. Cinq caractéristiques peuvent l'influencer :
1.teneur en matière sèche
2.teneur en matière solide volatile
3.production de biogaz par tonne de MSV
4.teneur en méthane des biogaz
5.éléments antagonistes dans la matière première

13 figure 27 et 28

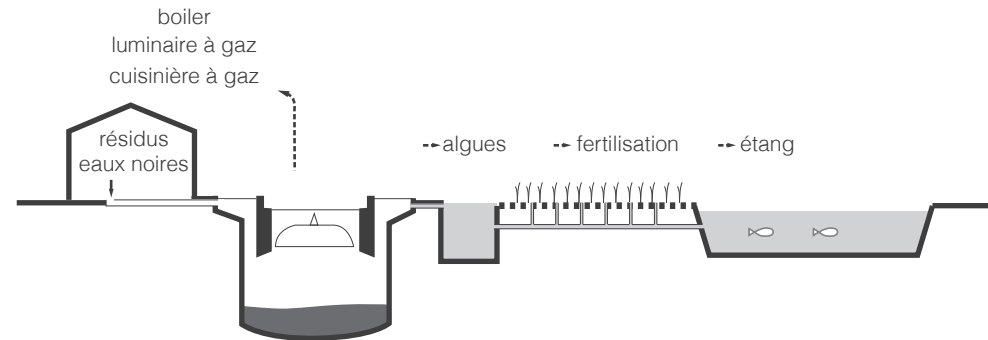


Figure 22. Coupe de principe méthanisation, relations

En Suisse, deux types de digesteur à déchets solides sont utilisés : les digesteurs municipaux et agricoles. Les premiers sont principalement dédiés aux déchets biogènes et acceptent les résidus agricoles et boisés. Ils ont une capacité de traitement pouvant aller jusqu'à 20'000 tonnes de déchets verts par année et s'adressent à l'entier d'une commune.⁹

Les digesteurs agricoles, plus petits et à l'échelle de quelques fermes, dégradent les déjections animales, lisier et autres résidus de ferme. En 2011, 80 installations de types agricole étaient en fonction en Suisse et 28 de type industrielles, pour une production d'électricité nette de 99 GWh et de 29GWh d'énergie thermique.¹⁰

La grande diversité dans les typologie de digesteur en font une technologie appropriable en milieu urbain.¹¹ Le rendement en biogaz n'étant pas dépendant de la taille¹², certaines entreprises développent des kit pour immeuble. L'important est de dimensionner le silo en fonction de la quantité d'intrants et de contrôler la qualité sanitaire du digestat, afin de pouvoir le réutiliser sans risques de pollution.¹³

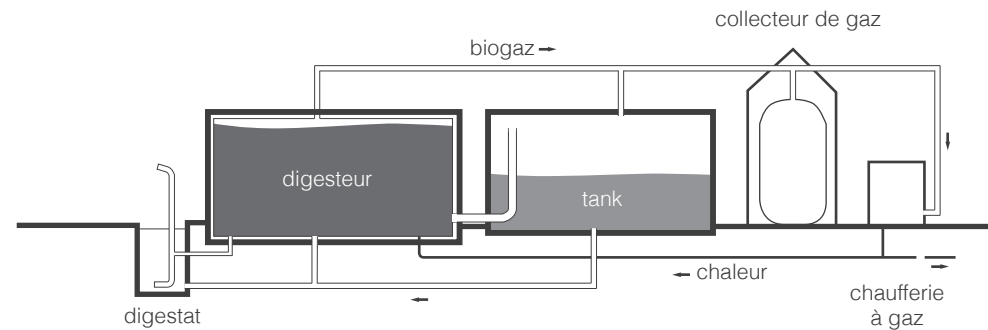


Figure 23. Coupe de principe méthanisation, valorisation biogaz avec cuve de stockage

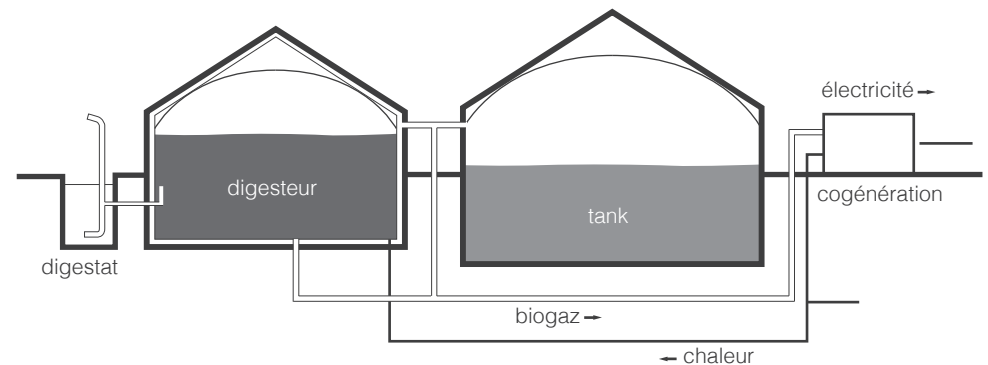


Figure 24. Coupe de principe méthanisation, valorisation cogénération avec cuve de stockage

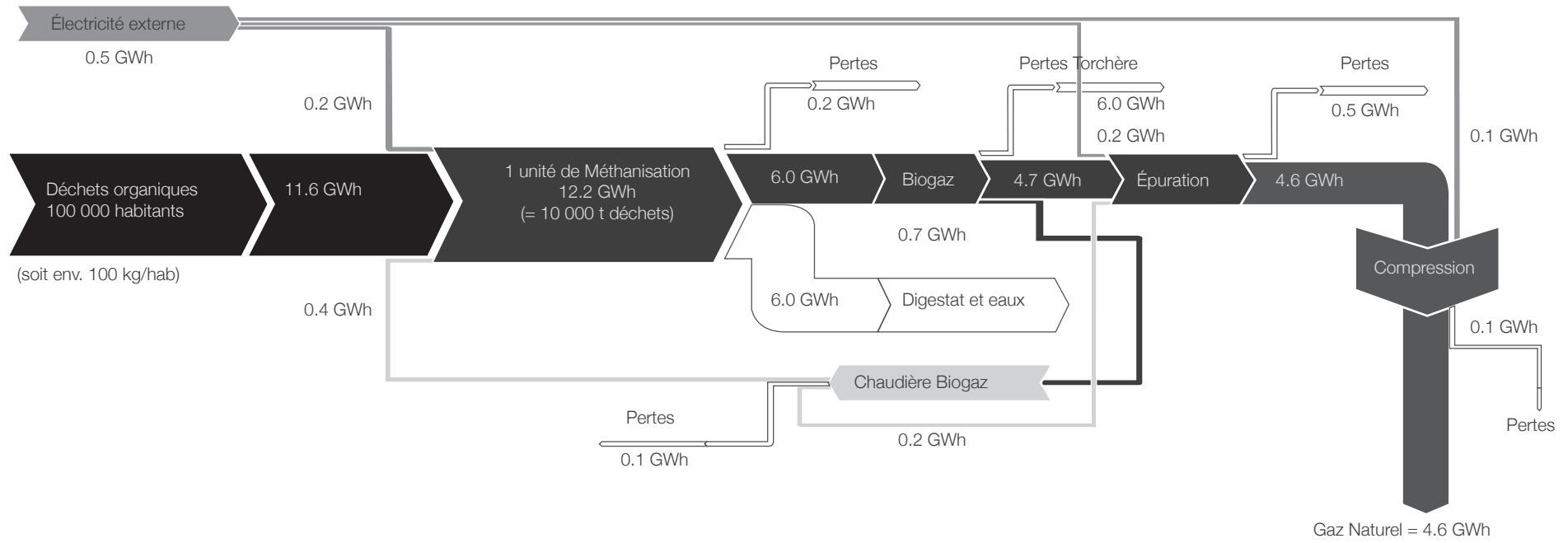


Figure 25. Bilan filière gaz redessin d'après [34]

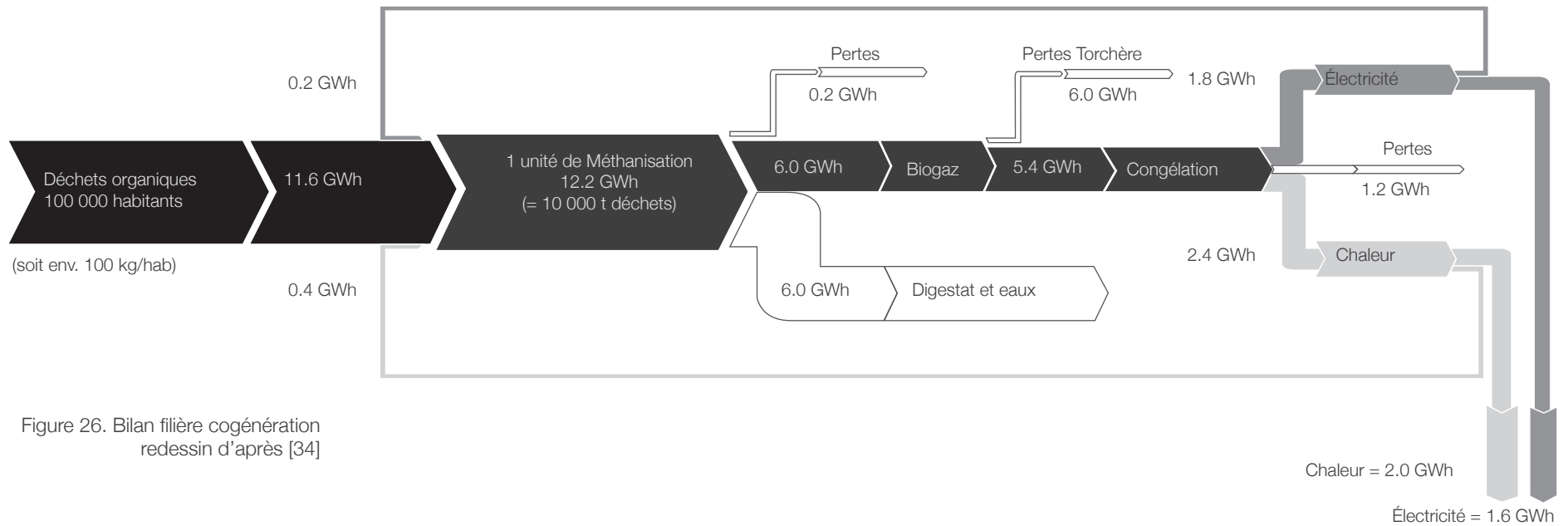


Figure 26. Bilan filière cogénération redessin d'après [34]

Valorisation du biogaz

Le biogaz produit peut-être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme bio-carburant de voiture.¹ Une étape d'épuration du CO₂ est nécessaire et rend la centrale dépendante d'un apport en électricité externe. Une chaudière à biogaz chauffe le digesteur en interne.² La Suisse est un des rares pays européens à autoriser l'injection de biogaz épuré dans son réseau de gaz naturel. Ce type de centrale mise sur la versatilité du gaz qui peut être acheminé sans perte de potentiel thermique jusqu'à sa consommation. Mais elles nécessitent d'être raccordées à une canalisation dont la dimension permet de supporter l'apport.

Certaines usines de méthanisation intègrent une centrale à co-génération utilisant le biogaz comme combustible pour produire de la chaleur et de l'électricité. Elles ont l'avantage de pouvoir consommer le biogaz sans traitement, réduisant les besoins en électricité. La production interne en énergie rend le système autonome.³ Par contre, un réseau de chaleur à distance étant nécessaire, ce type de centrale ne peut pas s'éloigner des zones urbaines.

En Suisse, la société Kompogaz a défini un standard et les nouvelles centrales se construisent sur ce modèle. L'usine de Chavornay, en fonction depuis 2011 près de Yverdon, en est un exemple. Elle traite les déchets verts des communes avoisinantes à hauteur de 20 000 t par années, correspondant à un bassin de population de 200 000 personnes. Le biogaz est valorisé sur site par co-génération, produisant 5 millions de Kwh soit l'équivalent de la consommation d'environ 1200 ménages. L'énergie produite est utilisée pour le chauffage des industries voisines.⁴

Potentiel énergétique et valorisation matérielle

Entre digesteur et conversion en énergie, de nombreuses décisions sont à prendre concernant la taille et le type d'infrastructures nécessaires. Il en existe toute une gamme, allant du méthaniseur industriel à l'échelle d'une région, à la micro-unité dimensionnée pour un bâtiment.⁵ Il est toutefois possible d'estimer le potentiel de valorisation thermique sans entrer dans ses questions, en se basant sur des fourchettes de valeurs standards.

1 [37]

2 figure 25 d'après [34]

3 figure 26 d'après [34]

4 <http://www.strid.ch/fr/54> et bafu.admin.ch

5 voir figure 27 et 28



Figure 27. Multiples dimensions. unités de méthanisation

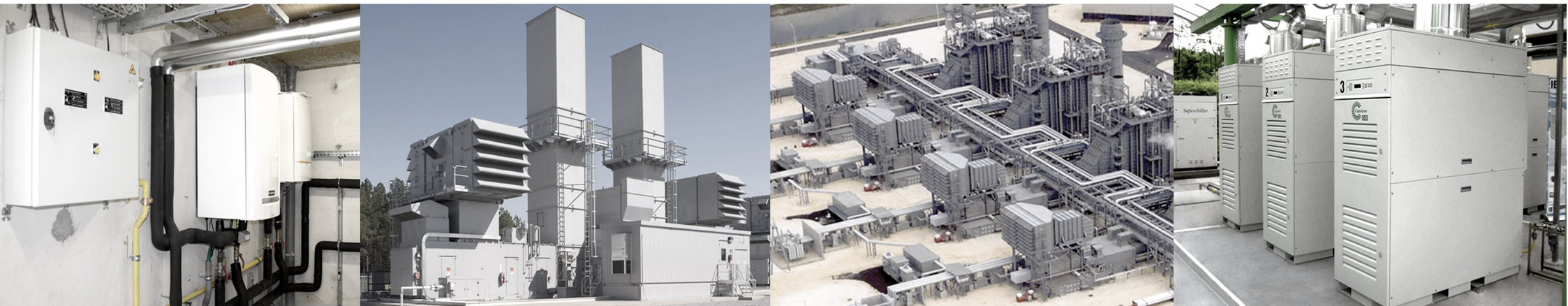


Figure 28. Multiples dimensions. unités de cogénération

Afin de déterminer le potentiel énergétique d'une ressource en biomasse, trois étapes sont nécessaires. La première évalue le potentiel thermique d'une ressource selon des valeurs moyennes données en kilowatt par kilo de matière sèche. Ces valeurs sont fournies par [18].¹

La deuxième étape correspond à la première conversion, c'est à dire, la production de biogaz. Celui-ci a un rendement moyen de 60% de méthane et de 40% de CO₂. En comptant les pertes de production en centrale, un facteur plus sévère de 0.5 est à appliquer afin de déterminer le potentiel thermique utile Du biogaz.²

La troisième étape correspond à la deuxième conversion par co-génération, c'est à dire, la production d'électricité et de chaleur. Selon les technologies, les rendements varient de 20% à 40% d'électricité produite et de 50% à 60% en énergie thermique.³

Concernant les rejets en CO₂, la valeur moyenne de 500g par kWh a été donnée par un rapport sur les systèmes de co-génération.⁴ Il s'agit donc de la quantité de CO₂ libérée lors de la combustion du biogaz. Les systèmes de récupérations du CO₂ à la sortie du digesteur sont encore artisanales, les valeurs sont donc estimées à partir de [39].

Le potentiel énergétique des eaux sales est inclus. Un facteur de 0.65 est à appliquer avant la première étape.⁵ Il correspond au rendement en boues sèches après épuration des eaux sales en STEP.

Les valeurs des résidus de digestion (boues d'épuration et digestats) proviennent d'un calcul à partir du diagramme du métabolisme de biomasse⁶ auquel sont appliqués les rapports issus du bilan énergétique des usines de méthanisation.⁷

Ce type de calcul se basant sur une collecte plus efficace des déchets. Un facteur de 0.8 est appliqué en amont aux déchets biogènes ménagers.^{8,9}

Le potentiel estimé ne tient pas compte des besoins en énergie de la centrale. Toutefois, un facteur peut être appliqué ultérieurement après détermination du type de digesteur. Le calcul implique également la co-génération comme système de conversion. Ce choix est fait suite aux diverses recommandations officielles, discussions et standards actuels qui reconnaissent l'efficacité de ce système.¹⁰ Le choix d'une micro-cogénération dans un immeuble ou d'une intégration à une centrale municipale existante est laissé pour après.

1 annexe 3

2 [27] et [34]

3 [38]

4 [39]

5 calcul d'après figure 14

6 ibid.

7 [34]

8 selon [16]

9 la feuille de calcul est en annexe 4

10 [17]

Rudologie : petit catalogue

*“La rudologie (du latin rudus qui signifie décom-
bres) est l’étude systématique des déchets, des
biens et des espaces déclassés. Elle a été créée
en 1985 par Jean Gouhier, géographe à l’université
du Maine. Les praticiens de la discipline sont les «
rudologues ».” wikipedia*

En parlant des déchets ménagers et des eaux
noires, ce chapitre cherche à estimer le potentiel
de production d’énergie à partir des déchets d’une
personne. S’ils sont liés au logement et au mode
de vie des habitants, ils ne sont pas les seuls rési-
dus urbains liés à l’habitat. De nombreuses autres
types peuvent être considérées dans une optique
de recherche d’échanges de biomasse.

Ce catalogue montre les potentiels de récupération
de résidu de biomasse issus de différents types
de surfaces ou processus industriels. Il dresse
un aperçu général de différents programmes que
l’on peut potentiellement mettre en lien avec ces
infrastructures de méthanisation. Ces surfaces
sont liées au potentiel d’un site donné et ne sont
donc pas intégrés tel quel au métabolisme. Ce
catalogue ouvre vers une approche de projet, avec
la possibilité d’intégrer les alentours d’un bâtiment.

Issues d’un étude allemande sur les potentiels de
récupération de résidu de biomasse¹ et complété
par les donnée de [17], les valeurs ont été rappor-
tées à des rapport de surface pour permettre une
utilisation sous forme d’indicateur simplifiés. Cette
liste n’est pas exhaustive et peut être ralongée au
cours du développement du projet de studio, avec
par exmple des valeurs concernant les bureau,
restaurants ou cantine.²

1 [40] ch. 1.2. Cette étude donne les potentiels de
résidu de culture, petit bois et résidu de production :
les surfaces totale en Allemagne.

2 travail en cours

3 il agit des résidu issus de ces surfaces tel que
résidu de culture, petit bois et résidu de production :
a par kilo de viande produite
b il s’agit ici des plantes et non des résidu
c par litres produit
d par kilo de viande produite



Figure 29. Rudologie Mj/unité représentative³

Ainsi, en faisant l'hypothèse d'une collecte plus efficace des déchets biogènes et un traitement par méthanisation, on peut estimer une production d'électricité entre 38 et 76 Kwh par personne par année et une production de chaleur de 76 à 114 kwh par personne par année.

Mis en rapport avec la consommation moyenne d'un habitant suisse, cette forme d'utilisation de ressources sur site permettrait de répondre de 5 à 11% de la consommation en électricité¹. Ce diagramme distingue les deux types de fermentation, l'un lié au flux des eaux noires, c'est à dire, potentiellement pollués et l'autre lié aux déchets biogènes. Ces derniers restent en partie incinérés dans les ordures et sortent du cycle des matières.²

Ce diagramme permet de discuter des typologies d'habitat et ouvre vers une approche de projet. En regard d'une optimisation des quantités de surfaces par habitant ou de scénarios de vie adaptés, il permet une comparaison facile de la part d'énergie fournie sur site par ce type de système.

On remarque, par exemple, que les résidus de CO2 et de nutriments issus de la méthanisation et de la cogénération restent non utilisés. En se réappropriant le fonctionnement des cycles de matière naturels peut-on imaginer bâtir un métabolisme de proximité autour de ces résidus ?

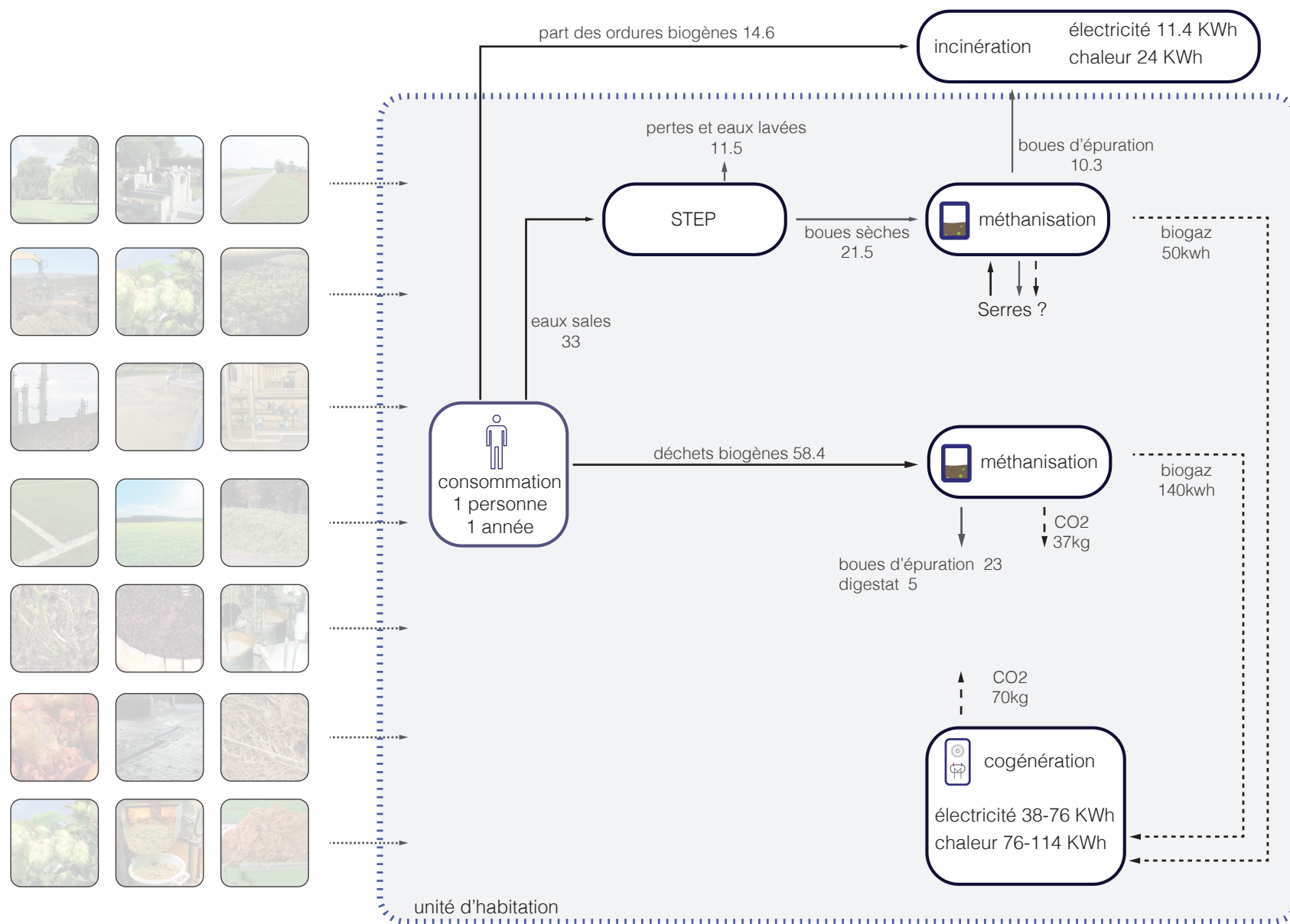
La question de l'échelle des infrastructures se pose. Si un doublement d'infrastructures peut amener à une consommation d'énergie trop élevée, liée aux besoins de fonctionnement interne d'une centrale, des usines trop éloignées augmentent les coûts de transports et la difficulté d'approvisionnement.³

1 ce ratio est dépendant de la typologie de l'habitat et des installations et appareils électrique. A titre de comparaison, trois personnes habitant un appartement de 90m2 dans un immeuble avec chauffage au gaz et cuisinière consomment en moyenne 2'100 kwh par année.

2 selon [16] on peut estimer passer de 50% à 80% de déchets biogènes collectés

3 par exemple, l'usine de méthanisation de Chavornay est desservie par rail pour une consommation moindre. Des communes adjacentes n'ayant pas de gare avec quai de déchargement ne sont pas desservies. (Source : strid.ch)

Figure 30. Variation autour de la méthanisation. kilo_teneur sèche/année





Légumes

Résidus

Nutriments

CO2

5.2 Intensifier les flux : le métabolisme résidentiel au sein des flux de biomasse suisse

Deux sous métabolismes se dessinent : la consommation avec la production végétale et la production animale avec la production végétale.¹ Comme évoqué précédemment, chacun répond à une problématique liée. L'agriculture suisse importe plus de la moitié de ses plantes nécessaires à la consommation alors que la plus grande part de sa production est dédiée au fourrage pour animaux.

Il n'est pas question ici d'une réorganisation des surfaces pour améliorer l'équilibre de la production. La culture fourragère propose des aliments pour animaux frais et de qualité et le manque de contrôle sanitaire des protéines importées est un réel écueil.²

Il s'agit d'une stratégie d'intensification qui fait l'hypothèse d'une amélioration en rapprochant les postes de production. En intégrant des serres agricoles dans la construction d'un métabolisme résidentiel, une typologie d'habitat est induite, en misant sur des rendements plus élevés de ce type d'agriculture et sur les possibilités de synergies autour des infrastructures de traitement évoquées précédemment.

Intégration d'un programme : serres agricoles

Afin de développer un métabolisme résidentiel, le diagramme des flux de biomasse suisse a été adapté. En effet, les résidus agricoles n'y sont pas exprimés. Ils n'y sont pas considérés comme des flux sortant, mais comme une source compostable directement restituée au sol.³ Afin de lier les serres au résidentiel, une étude sur les quantités de résidus de récolte ainsi que sur les rendements de production en serre est présentée. A partir de celle-ci différents scénarios de dimensionnement peuvent être élaborés.

Les échanges des serres au résidentiel sont simplifiés. Ainsi, ils ne transitent pas par l'industrie alimentaire. Il s'agit donc d'un scénario où les légumes sont consommés sur place, sans transformation. De plus, les serres nécessitent un enrichissement en CO₂⁴ pouvant être fourni par la combustion de biogaz en co-génération ou durant la méthanisation. Les quantités libérées est calculée et ajoutée dans le diagramme de projet.⁵

1 voir figure 14 et ch.2

2 voir ch.2

3 [18] ch.6.3.1

4 voir le 3ème cas d'étude, serres Agroscope

5 les valeurs en CO₂ sont fournies par [39] et [41] une serre nécessite environ 20kg/m²_année de CO₂

Le rendement en serre

En protégeant les cultures du climat extérieur, les serres offrent des conditions de culture stables. Elles permettent un contrôle de l'environnement, en maîtrisant la température et le niveau de CO₂. Du simple coupe-vent aux structures de contrôle optimisées, différentes typologies de serres existent. Il est question ici de serres en culture hors-sol.

Il s'agit d'un type de culture s'affranchissant des conditions du sol, pouvant s'intégrer dans un bâtiment. Les plantes poussent dans des pains de terre alimentés par un circuit fermé d'eau enrichi en nutriments. Les besoins en eau sont drastiquement réduits, la quantité de nutriments est optimisée en continu et les risques de maladie sont écartés.¹

Mais pas tous les types de plantations ne peuvent pousser en serres. Les grandes cultures céréalières ont besoin de place tandis que le raisin se nourrit des subtilités des terres sur lequel il pousse. Le houblon aime le vent et certains légumes ont besoin des insectes. Par contre, les légumes de maraîchages se prêtent bien à la culture en serre.² Tomates, concombre ou haricot en sont de bons exemples. Mais la véritable plus-value d'une culture proche du consommateur est de réduire

les transports et de permettre ainsi de cultiver des types de légumes qui auraient été trop fragiles au conditionnement.³

Ce contrôle sur la production améliore le rendement, mais nécessite d'alimenter les divers appareils nécessaires. Dans le cas d'un métabolisme résidentiel, avec production et consommation locale, différents types de légumes sont cultivés. Ainsi l'environnement des serres n'est pas optimisé pour un certain type de plantation, réduisant le rendement et augmentant la complexité dans le suivi de culture.⁴

Ces rendements font l'objet d'études officielles. Le centre de recherche Agroscope à Wädenswil et Conthey fournissent des directives de fumure,⁵ qui estiment les besoins en nutriments de différents types de culture plein-sol et hors-sol. En les comparant, on remarque que la culture hors-sol n'est pas nécessairement plus efficace. Certains types de plantation poussent mieux en plein sol et d'autres peuvent avoir des rendements plus élevés en culture hors-sol. Il s'agit donc d'une approche complémentaire. En regard des surfaces de maraîchage nécessaires à l'alimentation⁶, on peut estimer une surface de 7m² de serres par personne pour répondre à ses besoins en légumes.^{7,8}

1 voir le cas d'étude Agroscope

2 *"Le maraîchage (...) est la culture de légumes, de certains fruits, de certaines fines herbes et fleurs à usage alimentaire, de manière professionnelle, c'est-à-dire dans le but d'en faire un profit ou simplement d'en vivre, ce qui le distingue du jardinage"* wikipedia

3 [42] ce rapport critique sur les serres urbaines de Montréal cite les avantages en terme de transports et les synergies énergétiques des serres en toiture

4 [42] cite une perte de 33% de rendement en polyculture

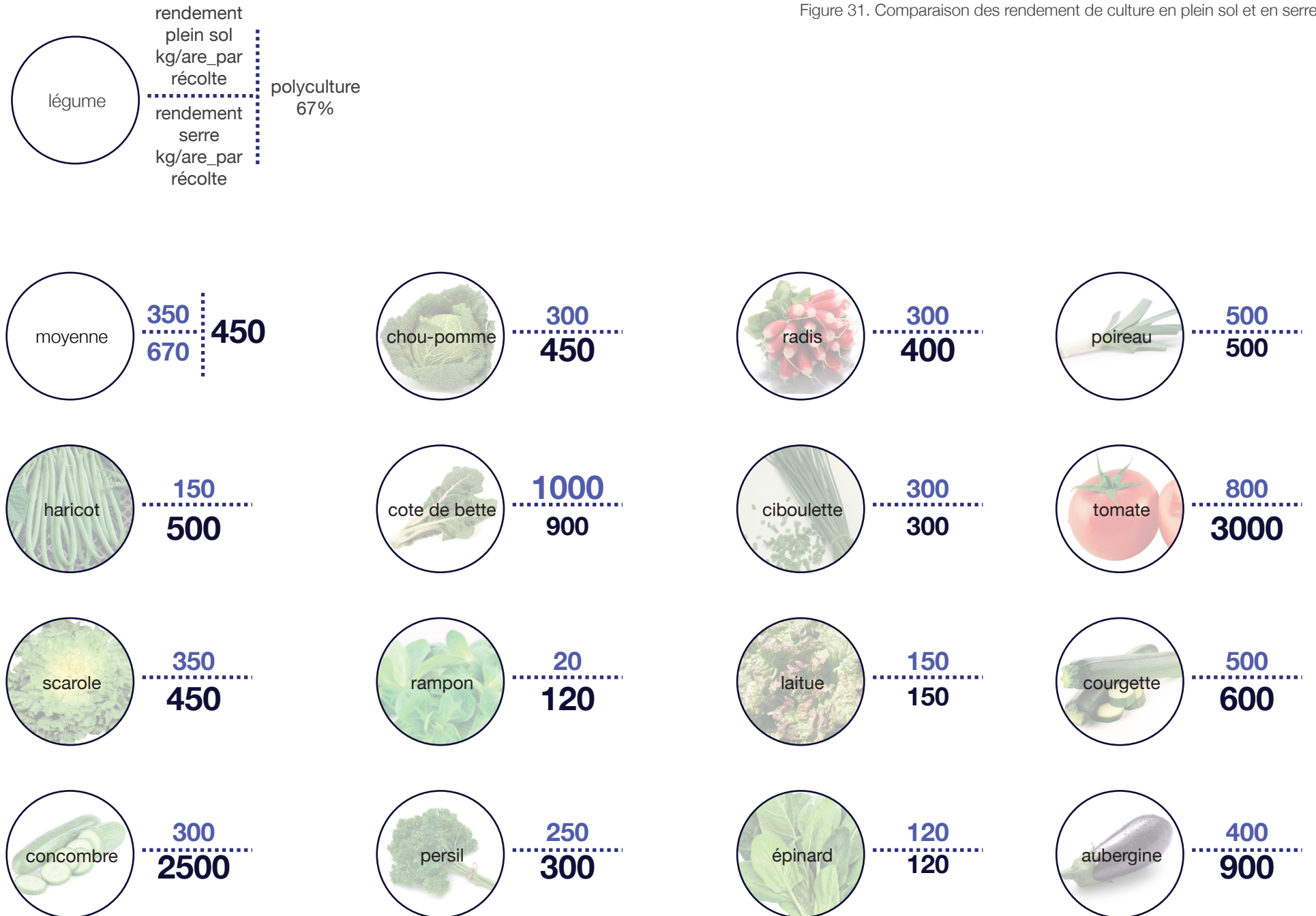
5 [43]

6 En moyenne suisse, une personne nécessite 10m² de surface de maraîchage pour ses besoins en légumes et herbes. (figure 16, d'après [22])

7 il existe différentes estimations de consommation. Par exemple, [44] une étude sur des "voisinages multifonctionnels" en Suisse cite une consommation moyenne de 2kg de légumes et herbes par semaine. [43]

8 à raison de trois récoltes par année en moyenne (selon visite Agroscope), on produirait 1350kg de légumes par année sur 100m², donc 95kg par année. Ce qui correspond à une consommation de 1.8kg par semaine par personne.

Figure 31. Comparaison des rendement de culture en plein sol et en serre



Les résidus de récolte

Les résidus de récolte comprennent les feuilles des plantes et racines qui restent en champ après la récolte. Dans le cas de la culture hors-sol, ces résidus ne sont pas comptabilisés dans les directives de fumure officielles. En effet, les apports en nutriment étant directement injecté dans le circuit d'eau, les résidus de récolte sont compostés et ne sont plus directement liés au cycle des nutriments. Ils ne rentrent donc pas en compte dans l'estimation des besoins nets.¹

L'objectif des directives de fumure est ciblé. Ainsi les valeurs sont exprimées selon les apports en phosphore, nitrate et azote. Dans le cadre d'un métabolisme résidentiel où les valeurs en kilos de matière sèche sont utilisées, ces valeurs ne permettent pas d'estimer la quantité de résidus correspondant.

Des directives de fumure allemandes fournissent ces valeurs.² Comme les tableaux sont similaires aux directives suisse et que les rendements allemands correspondant aux rendements suisses, ces valeurs en kilos, manquante dans les directives suisses, sont utilisées.

Un taux moyen de résidus de récolte en polyculture a pu être estimé. Cette méthode d'évaluation étant expérimentale, cette valeur a été comparée à un cas d'études et l'estimation est ensuite confirmée empiriquement par des travailleurs en serre. Il s'agit donc d'ordre de grandeur.³

Ce taux de résidus moyen permet de comptabiliser l'énergie que l'on peut espérer retirer autour des infrastructures de méthanisation. Pour 7m2 de serres par personne, on ne retirerait que 4 à 6kwh d'énergie thermique. Il faudrait ainsi plus de 700m2 de serres par personne si on espère répondre à la consommation moyenne en électricité.⁴ Ce type de dimensionnement est hors d'échelle et pose la question des critères visant à trouver un équilibre dans le métabolisme.

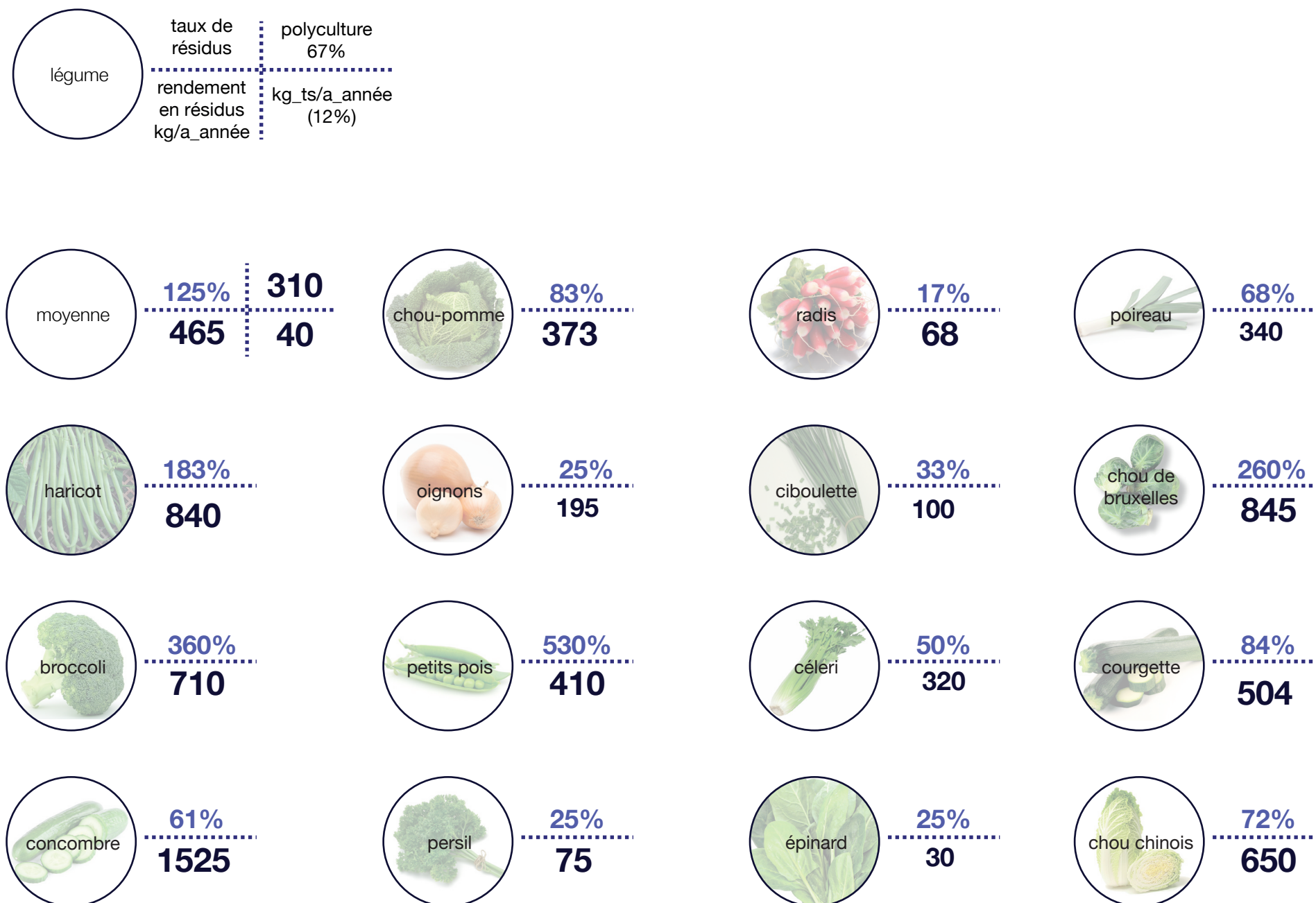
1 [43]

2 [45] et annexe 5

3 [46] il s'agit d'un projet hollandais de systèmes de polyculture. ils prévoient 9400m2 de serres qui produisent en retour 32'202 kg de matière fraîche de résidus et donc 340kg pour 100m2. Ce qui correspond à cette évaluation de 310kg de matière fraîche pour 100m2. Le taux de matière sèche de 12% est donné par [40]

4 voir note 1 p.40

Figure 31. Résidus de récolte



Serres et habitat : plusieurs visions de dimensionnement

En faisant le lien entre les cycles matériels de la biomasse et ses apports énergétiques, cette recherche pose la question des critères de dimensionnement. Faut-il privilégier l'énergie, les besoins en nourriture ou les besoins en CO2 ?

En misant sur un critère alimentaire, le thème de l'auto-provisionnement entre en ligne de compte. Mais les serres ne permettent pas de cultiver tout type d'alimentation. Elles ne concernent que les besoins en légumes de maraîchage, et ne concernent pas les grandes cultures de blé ou de colza ou la production animale.¹ En terme de surface, l'impact sur le territoire est minime mais correspond à une part non négligeable de l'alimentation.²

Un résident suisse nécessite en moyenne 10m² de surface de maraîchage.³ Comme le rendement moyen en serre de polyculture augmente d'environ 130%,⁴ on peut estimer les besoins en surface de serre à 7m² par personne pour répondre aux besoins en légume de maraîchage. Cette valeur doit bien sûr être augmentée des besoins en logistique spécifique.

Ainsi la production pour une autonomie en consommation ne peut pas être faite entièrement sur place et un phénomène d'échelle intervient. Cette typologie de bâtiment productif est inscrite dans le métabolisme d'un quartier, qui lui-même est inscrit dans un territoire plus large.

Du point de vue énergétique, on remarque que la stratégie d'intensification a un impact minime pour répondre aux besoins en énergie d'un logement. Produire suffisamment de déchets supplémentaire nécessiterait une surface de serre hors d'échelle.⁵

Mais le point de vue énergétique engage une autre réflexion. Cette forme d'habitat, avec une production de légumes liées au bâtiment, induit un scénario de vie adapté. On peut donc imaginer un travail sur les typologies d'habitat permettant de réduire la consommation en énergie afin de répondre à des objectifs énergétiques.

Actuellement, un logement de 90m² pour trois personnes comprenant cuisinière, lave-vaisselle et sèche-linge consomme en moyenne 2'550KWh d'électricité par année. Sans les équipements, la consommation moyenne baisse à 1650 KWh par année. En mettant en commun certains équipements, la demande en électricité serait considérablement réduite.⁶ Pour être complète, cette stra-

1 figure 16

2 figure 15

3 ibid.

4 figure

5 voir note 1 p 40

6 ibid.

7 [39] et [41] une serre a besoin d'environ 20kg par m² par année d'enrichissement en CO2

8 selon discussion avec M.Farquet lors de la visite des serres

9 <http://www.clarke-energy.com/fr/gas-type/natural-gas/greenhouse-chp/>

10 <http://continuingeducation.construction.com/article.php?L=227&C=698&P=4>

tégie nécessite un travail d'architecture répondant à une volonté de réduction de la consommation. Ce travail sur les typologies est une ouverture vers une intégration poussée des serres à un bâtiment d'habitation avec des espaces hiérarchisés et des synergies d'autre type.

Quand à eux, les besoins en CO2 sont liés aux infrastructures libérant du gaz carbonique. Ainsi les serres peuvent agir en synergie avec les fermenteurs des STEP, les digesteurs de méthanisation et les moteurs à co-génération et ce, à toutes les échelles. Les rejets de CO2 issus de la cogénération du biogaz produit par un habitant permet de répondre à 80% des besoins en enrichissement.⁷ Les serres Agroscope importent leur citerne de gaz depuis l'Asie.⁸ Il y a donc une piste de synergie de proximité entre le traitement et la production d'énergie et les serres.

Aujourd'hui des exemples de serres filtrent les rejets des moteurs à co-génération pour alimenter l'enrichissement en CO2 ou des projets de serre agricoles s'implantant près des usines de méthanisation afin de récupérer effluents et CO2 sont aussi en cours.^{9,10}

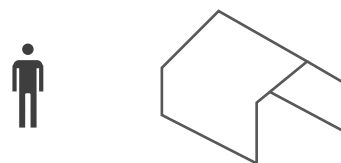


Figure 33. Vision alimentaire

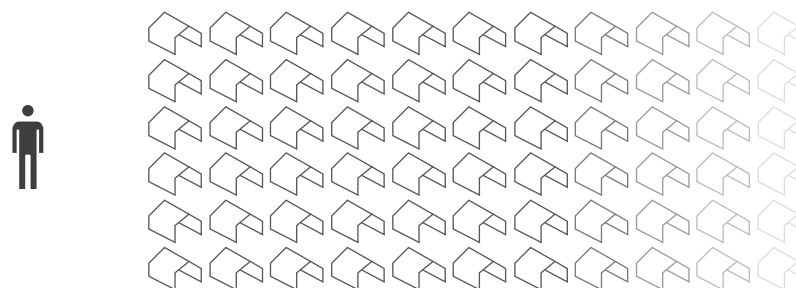


Figure 34. Vision énergie

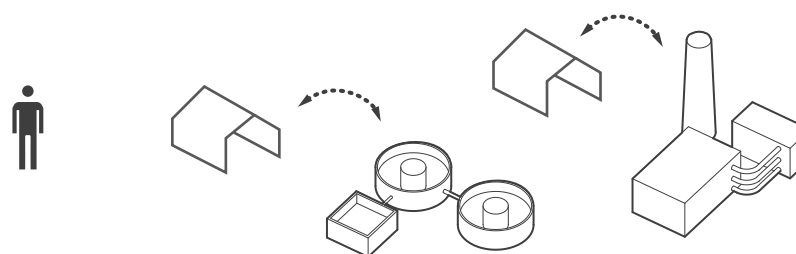


Figure 35. Vision capture de CO2

► Figure 36. Variation sur un métabolisme résidentiel. dimensionné pour répondre aux besoins en légumes d'une personne.
kilo_teneur sèche / année

Ce diagramme présente un premier résultat de recherche basé sur les flux de biomasse. A ce stade, on remarque qu'un rapport de 7m² de serres pour une personne répond à ses besoins en légumes de maraîchage. Mais, du point de vue énergétique, ce rapport ne suffit à répondre qu'à 10% de ses besoins moyen en électricité.¹

S'ouvre ainsi une approche de projet basée sur une réduction de la consommation. Des typologies d'habitat peuvent être développée, dessinant des relations fines entre serre et logement et ouvrant vers une intégration d'autres synergies tels que les échanges d'eau ou d'énergie.²

Un autre potentiel se remarque. 80% des besoins en CO₂ d'une serre peuvent être fournis par le traitement des déchets issus d'une personne.³ Ce type de synergies basée sur une capture du CO₂ par les serres peut se retrouver à d'autres échelles de la réflexion. Un territoire d'intervention entre l'échelle locale et le territoire suisse et incluant des infrastructures de traitement régionales, permet d'imaginer des symbioses entre une STEP ou une usine de méthanisation industrielle avec des serres. Ces infrastructures territoriales étant aussi alimentées en partie par les déchets de la personne-type du diagramme, un rapport territorial existe à partir de ce métabolisme.

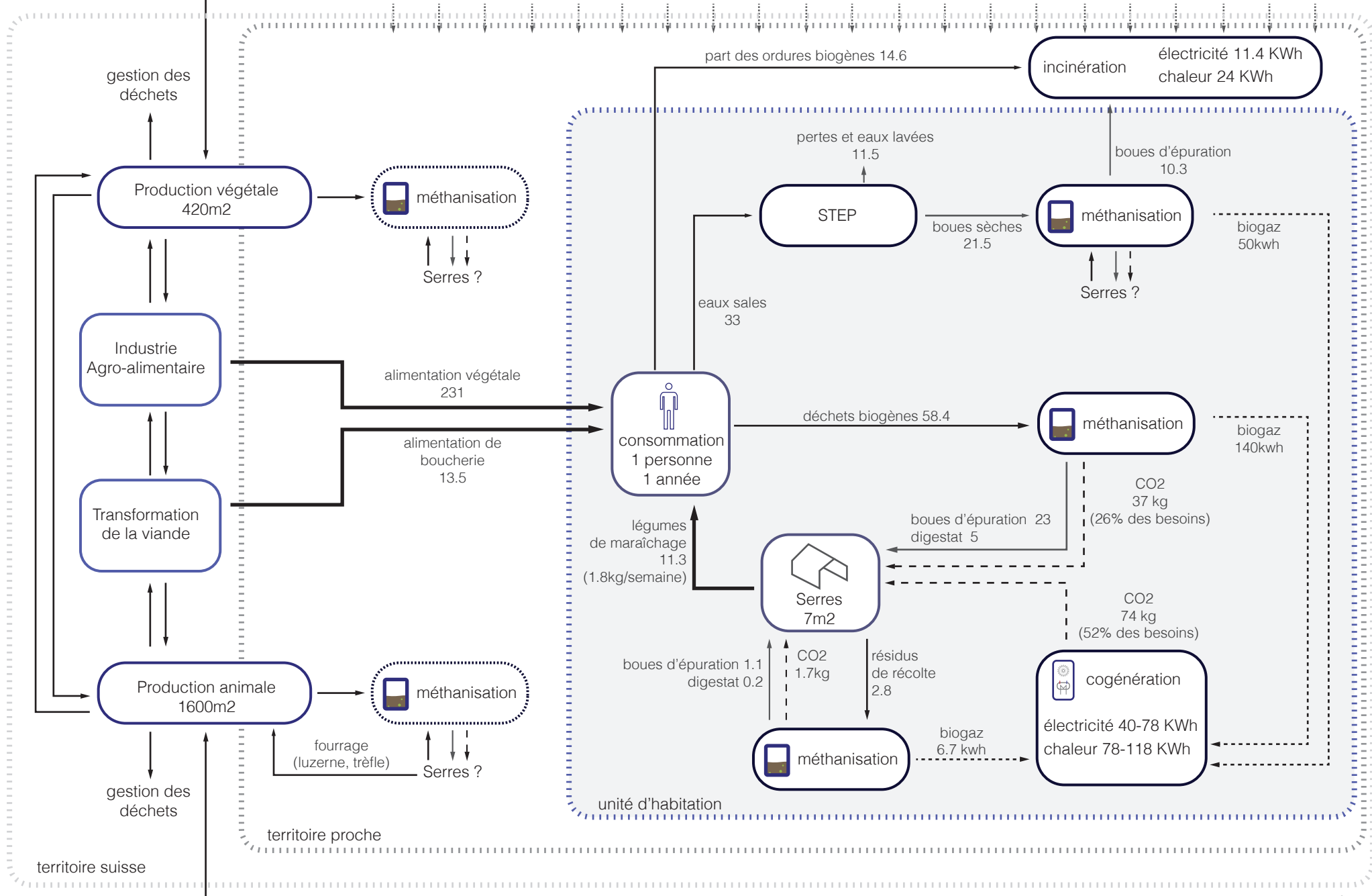
1 estimation basée sur la note 1 p.40

2 le cas d'étude 'De Zonneterp' présente d'autres types de synergies possibles

3 voir note 7 page précédente

4 [43]

5 le cas d'étude 'De Zonneterp' propose de réutiliser les eaux grises résidentielles purifiées par des algues. Cette eau, riche en azote, sert à diluer les digestats solides issus d'une unité de méthanisation



6. Etude de cas

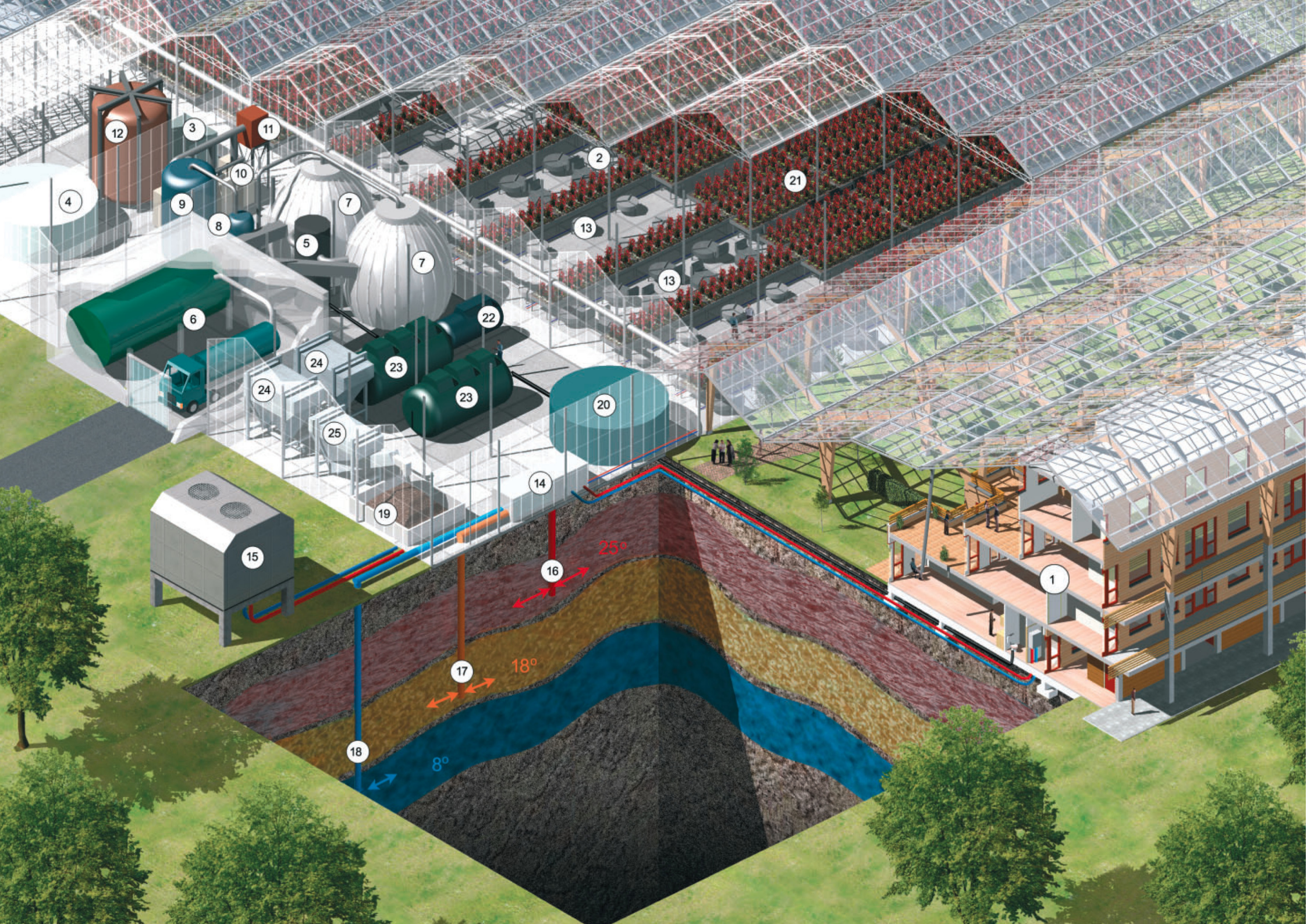
Afin de compléter cette étude d'un métabolisme résidentiel, trois cas d'étude sont présentés ici. Ils ont été choisis pour le potentiel d'apporter un point de vue complémentaire à cette recherche.

Le De Zonneterp est un projet hollandais d'habitat agricole, avec des serres accolées à des bâtiments résidentiels. Les auteurs cherchent à trouver des synergies entre les deux programmes. Leur objectif est de récupérer et stocker le surplus d'énergie des serres à l'usage des bâtiments résidentiels. Ils proposent un premier dimensionnement en fonction des synergies thermiques et aboutissent à un rapport de 2 hectares de serres pour 200 unités de logement. D'autres types de synergies sont proposées et permettent de préciser ce dimensionnement. Il s'agit d'un projet, et les détails techniques ne sont pas développés. Mais ce cas d'étude élargit le propos en apportant une vision basée sur les relations thermiques entre serre et résidentiel et présente des synergies possibles entre les deux programmes.

Hammarby Sjostad est un projet de renouvellement urbain de la ville de Stockholm, dont une partie s'est construite au début des années 2000. Il est salué pour son modèle d'intégration, avec un système de collecte séparative des déchets et une valorisation sur site des eaux sales. L'énergie

récupérée est restituée au quartier. Cet éco-quartier annonçait des objectifs thermiques élevés qui ont été réévalués au cours de l'avant-projet. La situation urbaine est similaire à celle d'Yverdon, avec des vues au nord sur le lac. Eco-quartier très en vue, ses performances énergétiques réelles sont analysées avec le recul du temps. Le concept urbain, mettant largement en avant les vues vers le lac, est un des grands facteurs à l'origine de la baisse de performance du quartier. Ce cas d'étude montre que des systèmes de collecte efficaces sont possibles, mais qu'il ne faut pas oublier la conception urbaine, la qualité de construction et le comportement des habitants.

Agroscope, à Conthey, est un centre de recherche suisse sur l'agriculture. Ce centre dispose de plusieurs serres et terrains agricoles entre Wädenswil, en Suisse allemande, et Conthey en Valais. A Conthey, les chercheurs développent des techniques de culture hors-sol en hydroponie. Comme ce type de culture exige des compétences spécifiques, une visite et discussion avec les responsables et agriculteurs ont permis de mieux comprendre le travail en serre. Le cas d'étude est complété par des rapports fournis par les personnes qui ont fait la visite.



◀ Figure 37. Complex 'De Zonneterp'

- | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1. appartement | 9. stockage du biogaz | 17. source tiède |
| 2. collecte de la condensation | 10. microturbines | 18. source froide |
| 3. traitement de l'eau potable | 11. refroidissement du gaz | 19. amendement pour sol |
| 4. stockage d'eau potable | 12. tampon d'eau chaude | 20. stockage de l'eau d'irrigation |
| 5. réservoir des eaux noires | 13. échangeur de chaleur | 21. culture |
| 6. déchets biogènes externes | 14. système de chaleur collectif | 22. séparateur de graisse |
| 7. fermenteur | 15. tour de refroidissement | 23. bioréacteur |
| 8. nettoyage du biogaz | 16. source chaude | 24. colon |
| | | 25. drainage |

6.1 De Zonneterp et les cinq cycles¹

De Zonneterp est un projet d'étude commissionné par "l'*Innovation network for rural areas and agroclusters*" en Hollande. Il fait partie d'une réflexion globale visant à développer les relations entre l'agriculture et l'habitat.² Dans un pays où la production agricole intensive est importante, de nombreuses recherches vont dans le sens d'une intégration de l'agriculture à l'urbain.³

Dans ce cadre, De Zonneterp étudie plus précisément les possibilités de synergies de proximité entre des logements et des serres agricoles. Celles-ci sont utilisées et dimensionnées en fonction des possibilités d'échanges d'énergie. Quatre synergies sont développées :

1. un système de chauffage, avec des serres captrices d'énergie et stockage en aquifère
2. le cycle de l'eau, avec la séparation des eaux grises et des eaux noires. De plus, un système de condensation dans les serres permet de récupérer de l'eau potable.
3. le cycle du carbone avec la récupération du Co₂ produit par une unité de méthanisation.

4. le cycle des nutriments avec une irrigation des plantes enrichies par les effluents de méthanisation et dilués par les eaux grises des logements.

Ces quatre systèmes sont interconnectés et fonctionnent ensemble. Par exemple, le cycle des nutriments est lié au cycle de l'eau. Ces systèmes ne sont pas nouveaux, mais le degré d'intégration projeté rend l'opération novatrice.

1 [47]

2 Cette réflexion globale est conduite par "l'*International Institute for the urban environment*", à Delft.

3 "Les Pays-Bas sont un pays aisé avec une économie ouverte, qui s'appuie fortement sur le commerce extérieur. Les principales activités industrielles sont le traitement de denrées alimentaires, la chimie, les raffineries de pétrole et la fabrication d'appareils électriques." .
wikipedia

d'autres études, comme [46], s'inscrivent dans cette thématique

Système de chauffage

Habituellement, en cas de surplus de chaleur, le serriste ouvre des fenêtres pour ventiler la chaleur vers l'extérieur.¹ Les serres captrices d'énergie opèrent différemment. En cas de surchauffe, une tour de refroidissement est actionnée et un échangeur de chaleur la récupère et l'achemine vers un élément de stockage annuel.²

Les températures de consignes se situant autour de 25°C, la proximité entre serre et logement est nécessaire pour être efficace. Il s'agit d'un chauffage eau/air à très basse température, où la température de circulation est de 25°C et la température de retour est de 21°C. Il consiste en de simples tuyaux reliant un réseau de canalisation, chauffé par le climat intérieur de la serre, à un système de stockage, par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Les auteurs n'ont pas considéré les pompes à chaleur, craignant une trop grande consommation en électricité.

Le réseau dans les serres est constitué de tubes en cuivre très fin de 0.1 mm de diamètre avec un coefficient d'échange thermique élevé (300W/m²). Il est suffisamment dense pour permettre de chauffer ou refroidir rapidement de gros volumes. (4000m³ d'eau/h) Ces tubes sont doublés d'une

maille permettant la circulation d'air pulsé. Ainsi, cet air est chauffé ou refroidit pour être ensuite soufflé dans les serres en soirée et en hiver. L'échangeur de chaleur est relié aux logements de la même manière. Une VMC double flux permet le chauffage du bâtiment.

Le stockage d'énergie se fait en aquifère. En Hollande, les aquifères sont relativement stables et permettent de conserver de la chaleur à l'année. Un gradient de température de 8°C à 25°C se forme dans la nappe, permettant de restituer de la chaleur stockée en hiver ou de pomper de l'eau froide pour le refroidissement de la serre.

Les caractéristiques du sol sont donc importantes et doivent permettre de restituer de la chaleur plusieurs mois après stockage et sur le même site. Ainsi, la nappe phréatique doit avoir un débit adapté afin de ne pas récupérer la chaleur à des distances éloignées du site.³

De Zonneterp développe donc un type de synergie de proximité entre serres et habitat basé sur des échanges de chaleur à basse température. La question de l'équilibre entre les besoins en énergie des habitations et la quantité de chaleur récupérable par les serres est développée. Leur conclusion attribue un rapport de 2 hectares de serres

1 d'après discussion lors de la visite des serres agricoles Agroscope

2 [48]

3 En Valais par exemple, ce type de stockage a été évoqué pour les serres Agroscope, mais une étude géologique a permis d'estimer que la chaleur stockée serait récupérée à 5 kilomètres en aval du site. En France, où cette technologie est étudiée par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), les caractéristiques du sol sont le principal écueil. Les études territoriales, déterminant les régions adaptées, se superposent aux études spécifiques au système.

4 d'après [48]

pour 200 unités de logement. Les autres cycles interviennent dans un deuxième temps, pour un dimensionnement plus précis.

Ce type de système est donc dépendant des caractéristiques climatiques et géologiques du lieu. Au-delà des difficultés d'accès à ce type d'informations, il engage une réflexion sur les activités ayant cours dans les serres. Si ce type de structure est développé pour son potentiel d'échange thermique, il n'y est théoriquement plus nécessaire d'avoir une production alimentaire et pourrait donc accueillir d'autres programmes. La relation entre serre et logement est de type énergétique, ce qui laisse la possibilité d'imaginer des jardins publics capteur d'énergie, des parking capteur d'énergie ou tout autre programme s'accommodant d'un certain degré de variation de température.

La définition des unités de logement n'est pas clair. Mais d'après les images de synthèse, il s'agit de logement de type Siedlung accueillant une famille. Les serres sont accolées aux logements et les échanges de chaleur se font depuis les serres vers les logements.

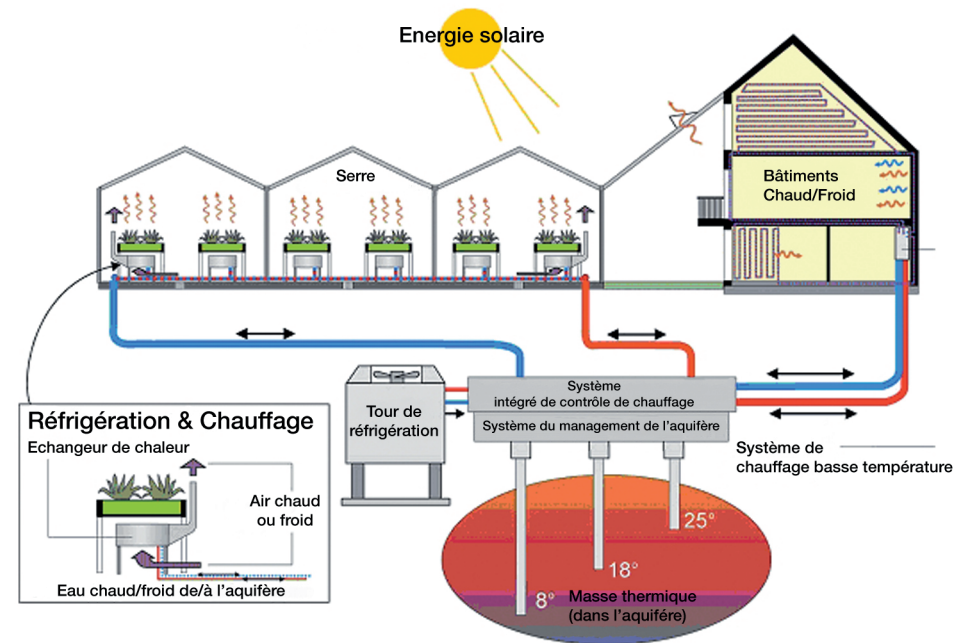


Figure 38. Cycle de l'énergie

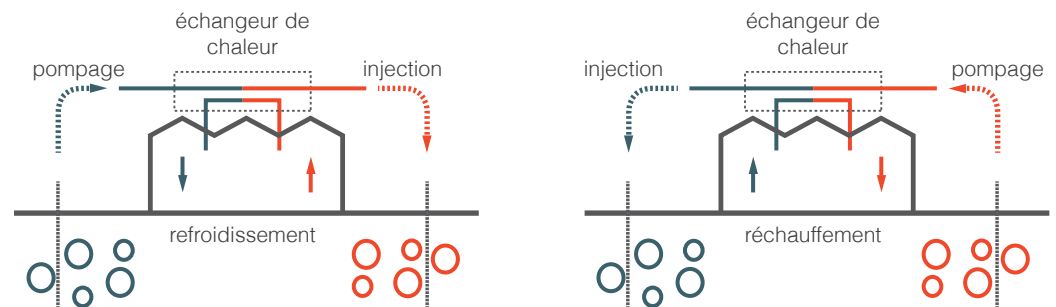


Figure 39. principe de stockage en aquifère⁴

Dans le même registre, des serres agricoles en toiture sont développées à Montréal par une entreprise agro-alimentaire.¹ Les auteurs citent le potentiel de production locale, avec des coûts de transports moindre, comme avantage. Du point de vue des échanges d'énergie, la logique est inverse. Les serres agricoles sont posées sur des toitures afin de récupérer les pertes de chaleur des bâtiments existants et ainsi diminuer la demande en chauffage des serres. Les échanges de chaleur se font donc ici du bâtiment aux serres.

Les serres urbaines de Montréal ne sont pas de type captrices d'énergie. Pour le De Zonneterp, les serres sont la sources d'énergie, tandis qu'à Montréal, ce sont les pertes des bâtiments qui sont utilisées. Qu'en serait-il si des serres captrices d'énergie s'intégraient à un bâtiment, avec un système de stockage annuel en ballon d'eau, s'affranchissant ainsi des conditions du sol ?

Le concept de chauffage est influencé par la typologie des serres. Si ceci engage des réflexions sur leur utilisation, la complexité de dimensionnement de cette synergie la rend difficile d'accès. Bien qu'elle puisse réparaître plus tard sous forme simplifiée dans la projet de studio, il s'agit également d'étudier les synergies de matière entre la production agricole et l'habitat résidentiel.

Le cycle de l'eau

L'agriculture a besoin de beaucoup d'eau. Un des avantages de la culture hydroponique en serre est d'utiliser l'eau en circuit fermé. Ainsi, la demande est drastiquement réduite, mais le contrôle de la qualité devient d'autant plus important.

Dans les serres du De Zonneterp, l'eau a deux utilités : refroidir les serres et apporter les nutriments aux plantations. Pour se faire, les auteurs distinguent les eaux noires des eaux grises. Les eaux noires sont les eaux des toilettes et les eaux grises viennent des lavabos, douches et évier de cuisine. Les eaux noires, riches en nutriments, sont acheminées vers une unité de méthanisation pour une valorisation en biogaz, digestat solides et effluents liquides. Afin de garantir un processus de fermentation efficace, les eaux noires doivent être maintenue aussi sèches que possible. Ainsi, des toilettes à vide d'air sont utilisées dans les logements, permettant la circulation des fèces sans utilisation d'eau. (figure 41)

Les eaux grises servent de vecteur pour le circuit de nutriments. Elles sont préalablement traitées par aérobiose dans des bio-réacteurs, afin d'optimiser le taux de nitrate pour l'irrigation des plantes. Ces bio-réacteurs sont des bacs d'eau

1 [42] et <http://lufa.com/fr/>

2 d'après [49]

remplis de végétaux flottants permettant de filtrer et d'améliorer la qualité nutritionnelle. L'eau purifiée est ensuite mélangée aux effluents liquides de l'unité de méthanisation. Ces effluents issus de la fermentation des eaux noires et des résidus agricoles sont riches en nutriments, mais nécessitent d'être dilués pour l'irrigation des plantes.

Pour refroidir les serres, les auteurs utilisent l'évaporation et la condensation de l'eau. Un taux d'humidité élevé de HR 85% est maintenu. Il permet de condenser l'eau évaporée par les plantes sur les parois des serres, qui est ensuite récoltée dans des tubes en plastiques perforés. Les plantes agissent donc comme un élément purifiant du cycle de l'eau. L'eau riche en nutriments irrigue les plantes qui ensuite la restituent par évapo-transpiration. Cette eau est potable et est réutilisée pour la consommation après traitement au charbon actif et adjonction de chaux.

Au sein du De Zonneterp, les serres agissent donc aussi comme un purificateur d'eau. Selon les auteurs, 95% de l'eau potable est issue de ce cycle. En séparant les eaux grises des eaux noires, une valorisation énergétique est possible tout en récupérant une certaine quantité de nutriments.

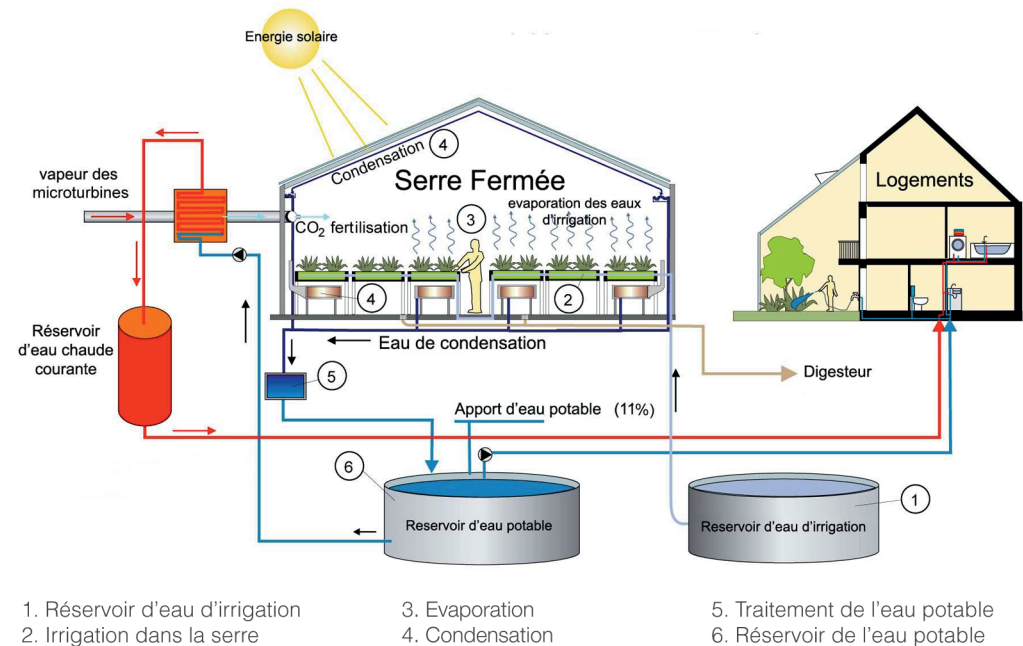


Figure 40. cycle de l'eau

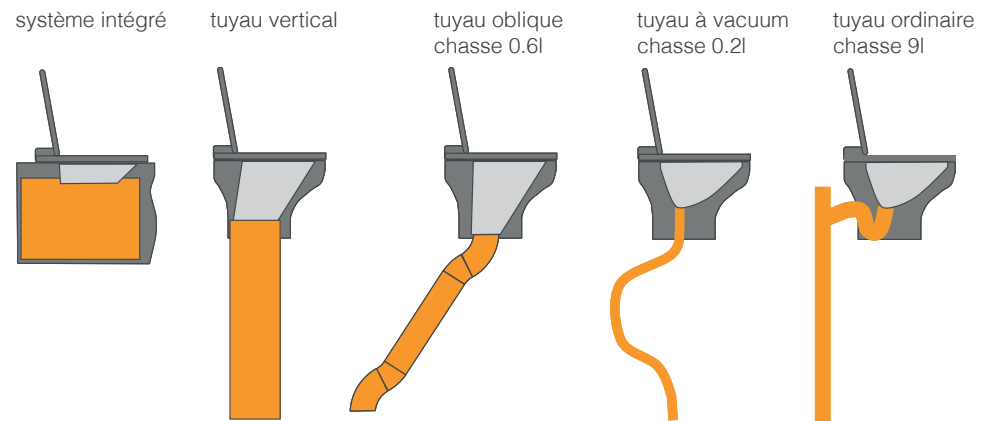


Figure 41. comparaison de système toilettes sèches¹

Le cycle du carbone et des nutriments

Les serres ont besoin d'un enrichissement en CO₂. Au De Zonneterp, celui-ci est fourni par une unité de méthanisation récoltant les déchets organiques ménagers, résidus agricoles et les eaux noires. Le biogaz est utilisé en cogénération pour chauffer l'eau sanitaire des logements et fournir de l'électricité. Cette conversion génère également une certaine quantité de CO₂ sous forme de résidus de combustion, qui est récupérée pour les serres.¹

Les effluents liquides du digesteur, riches en nutriments, sont séparés des digestats solide par drainage et introduits dans le système d'irrigation. Les digestats solides peuvent être utilisés directement comme mulch dans les serres (engrais superficiel), compostés pour une utilisation traditionnelle ou transformés en brique de tourbe pour alimenter un chauffage à bois.

Le système de séparation des eaux permet de fournir les nutriments nécessaires à la culture.² L'apport des résidus du méthaniseur est suffisant si ces effluents sont issus de la fermentation des eaux noires et des résidus agricoles. S'il proviennent seulement des résidus agricoles, un apport supplémentaire en engrais est nécessaire.

Ce système n'est pas dimensionné mais offre des pistes de réflexions intéressantes concernant les infrastructures nécessaires. En mélangeant les eaux noires avec les résidus agricoles, le digesteur récolte un maximum des déchets biogènes pour les nutriments et la production de biogaz, mais rend l'utilisation des effluents liquides et digestats comme engrais difficile. En effet, en mélangeant les eaux noires avec les résidus agricoles, les risques de pollution chimiques, dus à l'utilisation de produits de nettoyage ou de médicaments par les résidents rendent le processus de purification des engrais compliqués. Les auteurs éludent la question et proposent l'organisation d'achats collectifs de produits de nettoyage adaptés.

Si les serres permettent de récupérer une quantité de chaleur suffisante pour être auto-suffisant durant l'année, ce n'est pas le cas de la production d'électricité. La seule source est ici la combustion de biogaz. Les auteurs mettent en question une éventuelle intégration des déchets de voisinage, en dimensionnant plus largement le digesteur. Mais ils mettent en garde contre les coûts de logistique supplémentaires pour acheminer ces déchets vers le complexe.

¹ [42] et <http://lufa.com/fr/>

² Les nutriments essentiels aux plantes sont l'azote (N) les composés de phosphore (P) et potassium (K) et le carbone (C)

L'élément nutritif le plus sensible est l'azote. S'il est l'élément le plus présent dans l'atmosphère, (78% sous forme de N₂), à l'état gazeux, il n'est pas assimilable par les plantes. Les eaux noires contiennent de l'ammoniac (NH₄), qui peut être assimilé par les plantes et ainsi fournir l'azote nécessaire. Une eau riche en nutriments peut se composer ainsi : 225 mg N/l, 400 mg K/l, 40 mg P/l.

³ Il existe une usine de méthanisation dans une commune voisine d'Yverdon-les-Bains et une STEP est en fonction sur le site Du PDL.

Ainsi, la question de l'échelle de ces infrastructures est importante et les auteurs insistent sur la nécessité de connaître le site d'implantation avant de prendre la bonne décision. Le mélange des déchets agricoles avec les eaux noires résidentielles pose la question de la pollution des nutriments. L'axonométrie montre des installations conséquentes et visibles. On peut se demander à quel point elles peuvent être intégrées à l'urbain. Il serait judicieux de faire un cas d'étude plus précis sur les conditions d'Yverdon.³

Même s'il s'agit d'un projet, ce cas d'étude permet d'avoir une vision générale des types de synergie possibles entre des serres agricoles et des bâtiments résidentiels. Echanges d'énergie, cycle de l'eau et des nutriments peuvent agir en commun. Malgré tout, la complexité d'intégration rend le projet difficile à appréhender. Certaines idées peuvent être adaptées, comme la gestion de l'eau et des nutriments. On verra par la suite que le site choisi permet de soulager une partie de la problématique, avec des infrastructures de gestion des déchets existantes.

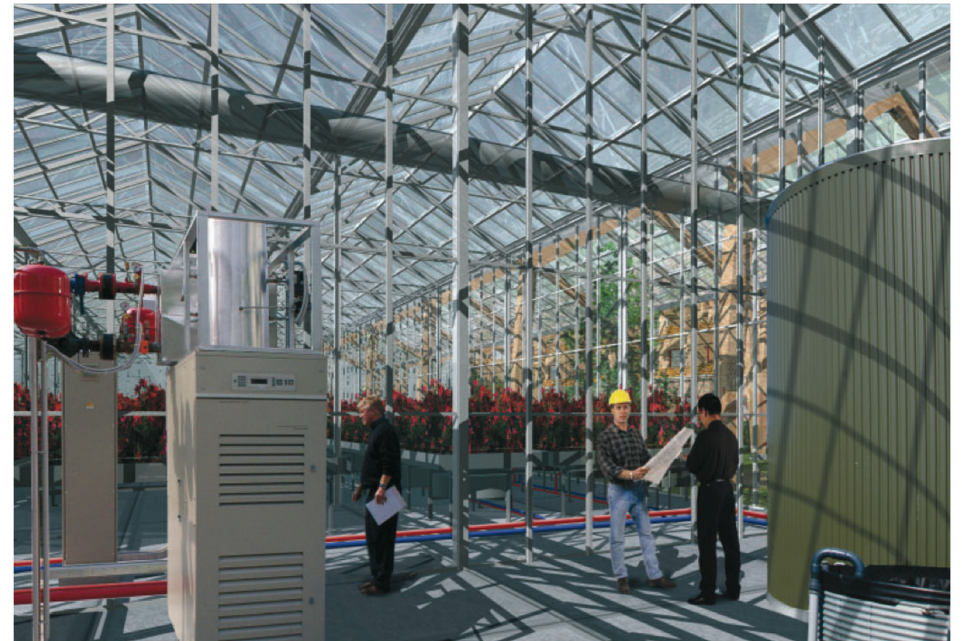
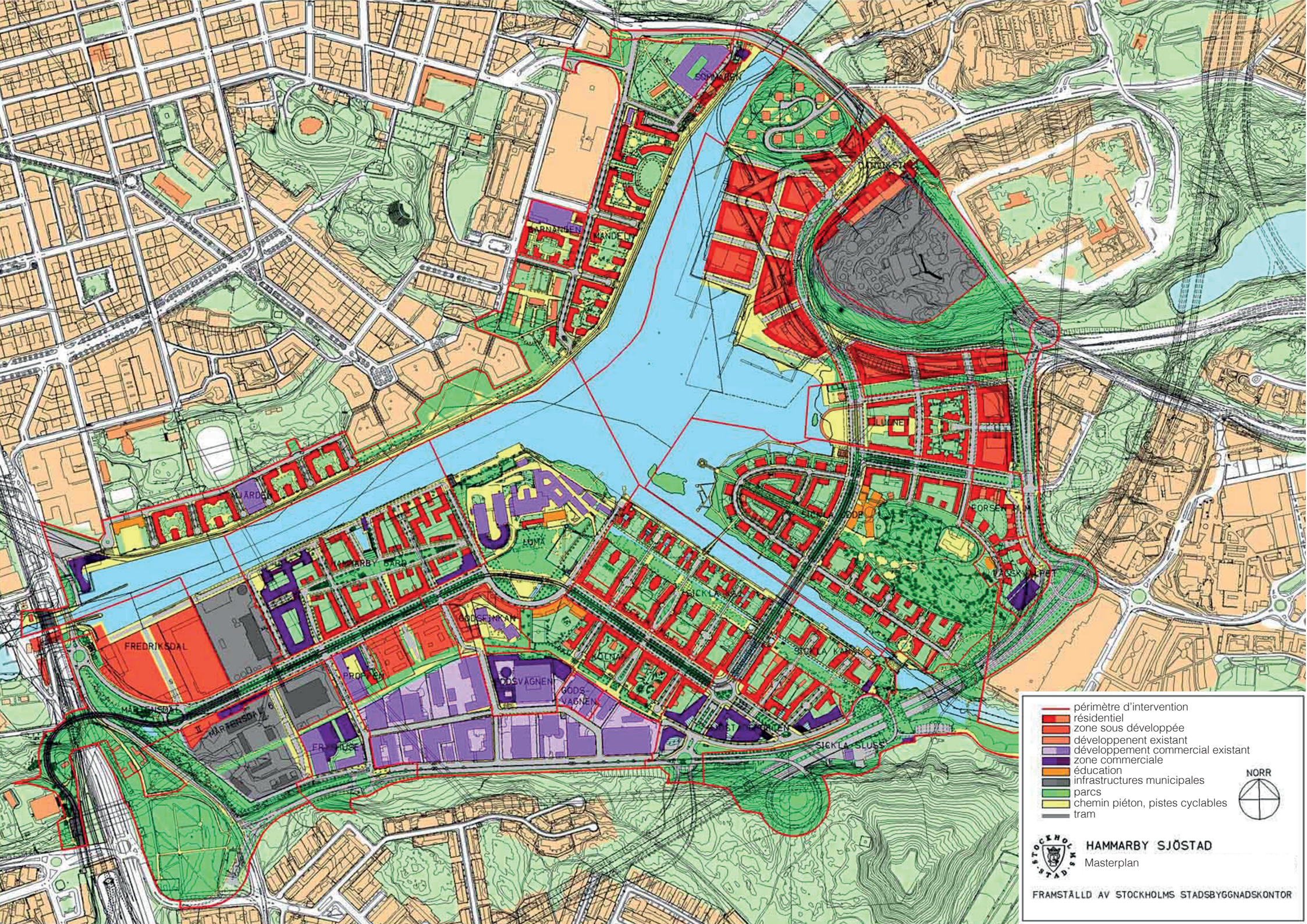


Figure 42. travailler dans les serres



Figure 43. vivre dans les serres



- périmètre d'intervention
- résidentiel
- zone sous développée
- développement existant
- développement commercial existant
- zone commerciale
- éducation
- infrastructures municipales
- parcs
- chemin piéton, pistes cyclables
- tram



HAMMARBY SJÖSTAD
 Masterplan

FRAMSTÄLLD AV STOCKHOLMS STADSBYGGNADSKONTOR

6.2 Hammarby Sjöstad : l'importance de la conception¹

Au début des années 90, dans une période de boom économique, Stockholm initie un programme de développement de la ville afin de répondre à la demande en logement. L'objectif était de '*construire vers l'intérieur*' et a débouché sur un masterplan en 1997. Hammarby Sjöstad en est le projet phare. Le processus de construction a commencé en 1998 et est prévu d'être terminé pour 2017 avec 11'500 unités de logement et 250'000m² de surfaces commerciales pour un total de 35'000 personnes habitant le quartier.

Hammarby Sjöstad est le plus grand programme de développement urbain mixte de la ville de Stockholm depuis les années 60. Ce projet est reconnu pour son modèle de développement durable. La complexité de l'intervention, entraînant des expropriations, une décontamination du site pollué et la nécessité de construire de nouvelles infrastructures, a poussé la ville à assumer le rôle de coordinateur de projet. Le sous-quartier de Sickla Udde, premier à être construit, est sujet à de nombreuses études monitorant ses performances. En 2012, 8'000 logements y accueillent des résidents.

Le site est difficile, situé sur une ancienne zone industrielle, dans une vallée peu venteuse et des conditions d'irradiations solaires faibles en hiver. Mais l'objectif énergétique est ambitieux : répondre à la moitié des besoins en énergie par des ressources sur site. Afin d'y arriver, la ville a initié un projet de gestion intégrée des flux de déchets. Ce modèle inclusif nécessite une coordination poussée entre les différents acteurs.

Un groupe de travail a été formé, le Hammarby Sjöstad project team et regroupent les partenaires privés et publics impliqués. Le plan de quartier délivré est complet mais très directif sur la forme urbaine, avec des îlots à cour intérieure reprenant la forme urbaine de Stockholm. Des infléchissements des masses sont déjà projetées et forment des espaces publics sur rue tout en ménageant des vues sur le lac. Chaque îlot doit être projeté par un architecte différent. Ainsi, ils assurent une certaine diversité tout en conservant une cohérence d'ensemble.

◀Figure 44. Masterplan Hammarby Sjöstad²

1 [50], [51], [52], [53], deux études ont été trouvées sur les sites des communes de Lausanne et de Zürich

2 Ville de Stockholm

Transport

le groupe de travail poursuit un objectif ambitieux. 80% des trajets devraient se faire à pied, vélo ou par transports en commun.

Pour se faire, le quartier s'organise autour d'un axe traversant au long duquel un tramway circule. Quatre arrêts sont disposés de telle manière que chaque îlot est à une distance maximale de 300m. Des axes transversaux lient les différents îlots entre eux et des chemins sont ménagés à l'intérieur des îlots. Une attention particulière a été donnée aux rues, avec une largeur généreuse permettant une utilisation combinée par les piétons, vélo et voiture. L'impact sur la perméabilité des sols des parkings est minimisé en les intégrant dans les sous-sols des blocs.

Une étude ultérieure rapporte que 52% des trajets se font par transports en commun, 27% à pied et 21% par voiture. Ainsi, l'objectif initial est atteint. L'attention particulière aux hiérarchies des réseaux de mobilité apporte une réelle plus-value. Les raccourcis ménagés à travers les cours intérieures en sont un bon exemple.

Forme Urbaine

La forme urbaine reprend la typologie de la ville de Stockholm, avec une largeur de route de 6 à 18m et des îlots de 70x100m. La hauteur des bâtiments varie de 4 à 5 étages le long du canal Sickla et de 6 à 8 étages le long des axes principaux. Les commerces se placent au deux premiers étages et les parties hautes sont dédiées aux logements.

Les blocs s'infléchissent, générant des espaces publics sur rue. Une hiérarchie se crée entre un axe principal traversant l'ensemble du quartier, les cours intérieures publiques et les espaces sur rue. Chaque îlot s'organise perpendiculairement au front de lac, ménageant des vues. Leur typologie, traitée individuellement par un architecte, n'est pas fixe. Les îlots s'ouvrent ainsi de différentes manières, proposant une diversité dans les formes, mais toujours contenue au sein d'une grille de rues. Des bâtiments, abritant différentes aménités, ponctuent l'axe principale jusqu'à une place centrale. Le centre d'information 'Glashuset' en est un exemple.¹ Ce bâtiment iconique en verre intègre différentes technologies et permet de communiquer sur le fonctionnement du quartier.

1 [51]

2 <http://contemporarycity.org/2014/04/stockholm/>

La charte architecturale est directive et détaille les listes de matériaux, couleur ou type d'ouverture autorisées. Elle intègre également des détails d'architecture du paysage pour traiter les cours intérieurs.



Figure 45. Hammarby Sjöstad au bord du lac²



Figure 46. Sous-quartier Sickla Udde

Architecture du paysage

Les espaces verts poursuivent plusieurs objectifs. Ils sont placés de telle manière que chaque îlot de bâtiment dispose d'un parc dans un rayon de 300m. Un réseau de parc aux typologies variées se dessine et définit l'identité de chacun des sous-quartiers, tout améliorant la qualité de l'air.

Un canal de rétention végétal parcourt le quartier dans sa longueur¹ et permet de récolter et de purifier les eaux de pluies par décantation. Elles sont ensuite collectées pour les acheminer dans le lac. Des toitures végétalisées couvrent les bâtiments, afin d'améliorer la récolte des eaux de pluie séparative.

Le canal est bordé de plusieurs sculptures ou détails paysagers permettant une appropriation des rues. Les bords de lac varient dans les typologies, allant des quais à bateau urbain à des bordures naturelles. Le paysage naturel a été préservé autant que possible et une forêt de chêne est protégée au nord-est du quartier. Ces interventions permettent de conserver un biotope riche.

1 figure 51

2 En Suède, la moyenne était de 270 kwh/m2/année au moment du projet

3 www.energie-environnement.ch/

4 figure 47, selon [50]

Consommation en énergie

Les objectifs de consommation en énergie étaient ambitieux. À l'origine, ils étaient de 60kwh/m2/année, mais les coûts économiques auraient été trop élevés. Par la suite, ils ont été réduits à 105 kwh/m2/année², répartis en 35 kwh/m2/année de consommation électrique et 70kwh/m2/année de consommation en énergie. En comparaison, une maison construite au standard Minergie-P, en Suisse, consomme 30 kwh/m2/année d'énergie de chauffage.³

Des mesures ont été prises en 2005 et ont déterminé une moyenne de 46 kwh/m2/année de consommation électrique et de 111 kwh/m2/année de consommation énergétique. Les objectifs n'ont donc pas été atteints. Si la consommation électrique est similaire selon les bâtiments, on remarque une gamme allant de 47 kwh/mw/année à 177 kwh/m2/année en consommation d'énergie de chauffage, selon la situation des bâtiments.⁴

La conception architecturale a eu donc un grand impact. Les larges baies vitrées, dirigées vers la vue au lac plein nord, ont augmenté les pertes de chaleur en hiver sans apports de gains solaires. Les ouvertures est et ouest ont augmenté les besoins en énergie de refroidissement en été.

Ainsi, le plan masse, en organisant les îlot perpendiculairement au lac, a produit une diversité de situation selon les bâtiments. Certains ont une vue plein nord, et d'autres ont des ouvertures est et ouest trop généreuses. Ainsi, le travail sur les typologies et la forme urbaine participe pleinement aux objectifs énergétiques.

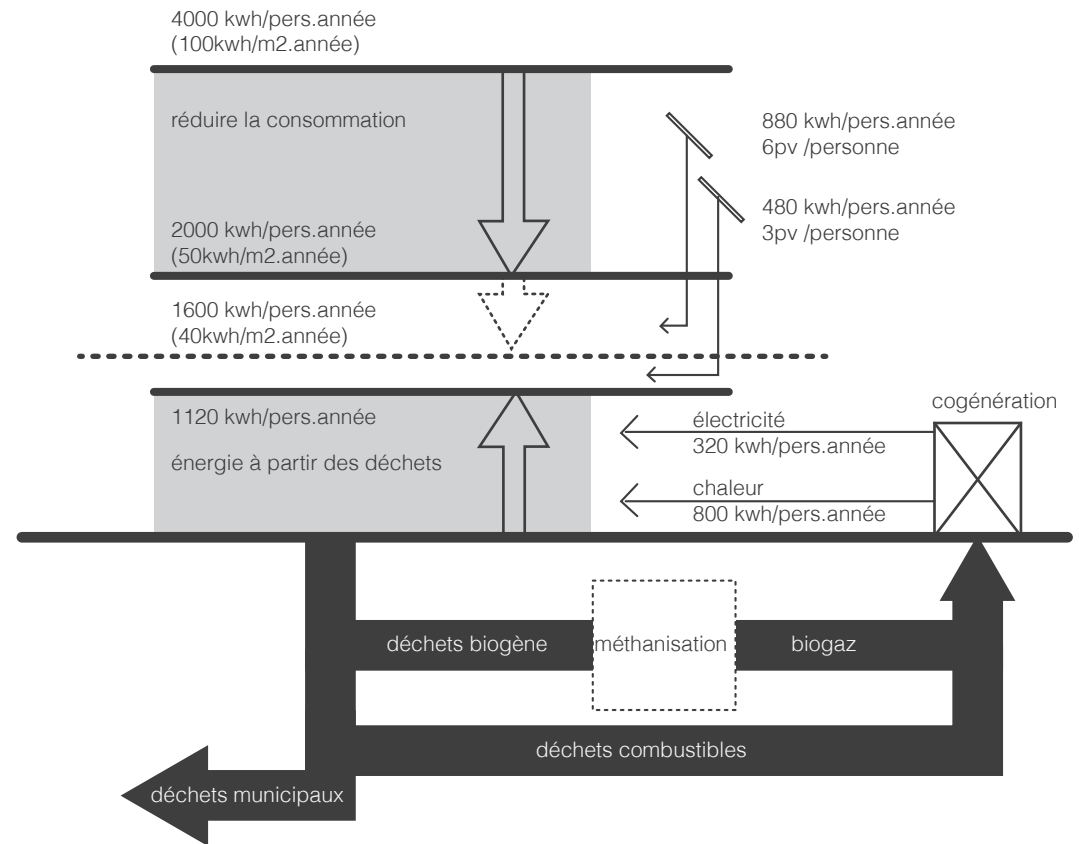


Figure 48. réduire / produire ⁴

Figure 47. comparaison des objectifs avec les performances réelles

kwh/m2/année	objectif	objectif initial	mesure	intervalle
électricité	35	20	46	40-51
thermique	70	40	111	47-177
total	105	60	157	87-228

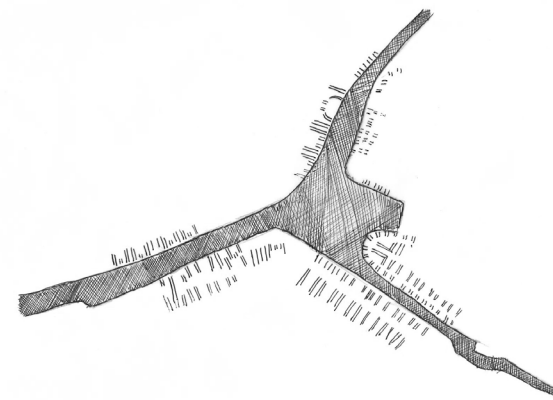


Figure 49. perpendicularité au lac ⊕

Sources d'énergie et gestion des déchets

Les objectifs fixaient une consommation en énergie fournie à 50% par les ressources sur site. Des systèmes de gestion des déchets et de récupération de la chaleur des eaux sales ont été installés et des panneaux photovoltaïques et thermiques complètent les apports.

Les déchets ménagers sont triés, puis acheminés à travers un réseau souterrain de tubes à vides d'air vers leur filière de valorisation. Ils n'y a ainsi pas d'intermédiaire entre collecte et traitement. Cet impressionnant système permet de réduire les coûts et pollution liés au transport de déchets. Les déchets combustibles sont acheminés vers une centrale à cogénération produisant de la chaleur et de l'électricité pour le quartier. Les déchets biodégradables sont compostés en dehors du quartier pour fertiliser l'agriculture locale.¹

Les eaux sales sont traitées dans une station d'épuration situées hors du quartier.² Les boues d'épuration sont fermentées et valorisées en biogaz utilisé pour alimenter les cuisinières des appartements, produire de l'électricité ou comme carburant pour les bus municipaux. Après traitement, et avant qu'elles ne retournent dans le lac, une pompe à chaleur récupère l'énergie thermique de cette eau et l'achemine aux quartiers à travers un réseau de chaleur à distance.

Ce système intègre donc plusieurs types de ressources et permet de récupérer de l'énergie à différentes étapes de leur traitement. Il a imposé une collaboration soutenue entre les différents services municipaux. Ces étapes ne sont pas toutes monitorées, c'est pourquoi il est difficile d'estimer concrètement l'apport de chacun des résidus dans la production d'énergie. Malgré tout, des valeurs standards permettent de les évaluer.³ Afin de comparer avec la consommation en énergie par m², ces valeurs sont rapportées à la surface moyenne des appartements (80m²) et leur densité (2.27). Ainsi, la production d'électricité et d'énergie thermique par unité de surface est estimée à 5.9 kwh/m²/année et 25.4 kwh/mw/année.

Ce niveau de production aurait répondu aux objectifs initiaux de consommation en énergie.⁴ Mais les mesures réelles réduisent cette proportion à 20% de la consommation en énergie fournie par des ressources sur site.⁵ L'objectif n'est pas atteint, mais ce type d'approvisionnement par les déchets permet une base de production énergétique continue, contrairement aux panneaux photovoltaïques ou thermiques.

1 annexe 5

2 une station de traitement pilote, plus petite, est installée dans le quartier.

3 figure 53, d'après [50]

4 à l'origine, les objectifs de consommation étaient de 60 kwh/m²/année

5 au contraire de de Zonneterp, les déchets biogènes ménagers ne sont pas méthanisés, mais compostés. Les déchets non biogènes sont incinérés et c'est à travers cette incinération que de l'électricité ou de l'énergie est produite. On pourrait imaginer une production d'énergie encore plus grande grâce à la méthanisation.



Figure 50. bouches de collecte



Figure 51. canal de rétention



Figure 52. logistique

Hammarby Sjöstad montre qu'une gestion intégrée des ressources permet de réduire la facture énergétique. Mais cette gestion implique une étroite collaboration entre les différents acteurs. Le plan d'urbanisme fourni est très directif et a été critiqué par les architectes pour son manque de diversité. En reprenant la typologie urbaine de Stockholm, il ne permet pas la recherche de nouvelles formes.

Malgré tout, il fournit des recommandations très détaillées en terme d'architecture du paysage qui n'auraient pas forcément été pensée autrement. On pourrait imaginer élargir ces recommandations et proposer des prototypes de patio et de rues fonctionnant en synergie.

L'enseignement majeur porte sur l'importance de la forme urbaine. Tout ces efforts de coordination et d'intégration auraient été plus visibles, si elle intégrait dès le départ le problème des façades nord ouvertes à la vue. Mais aurait il été possible de faire autrement ?

Un plan d'urbanisme répond à une multitude de critères et s'il ne faut pas sacrifier la qualité urbaine pour de meilleure performances énergétiques, il est tout de même surprenant de voir ici l'impact d'une composition urbaine sur les performances.

Figure 53. énergie produite sur site

kwh par personne / année	thermique	électricité
54.750 l d'eaux usées	0.396	n/a
4.1 m3 de biogas	8.5	5.7
450 kg de déchets combustibles	886.0	202.0
total	894.9	207.7
total par surface densité 2.27 surface moyenne des appartements 80m2	25.4 kwh/m2/année	5.9 kwh/m2/année



6.3 Serre hydroponique Agroscope à Conthey : le travail en serre

Agroscope est un centre de compétence suisse pour la recherche agricole rattaché à l'Office fédéral de l'agriculture. Dans un contexte agro-alimentaire mondial en pleine évolution, ce centre développe des solutions innovantes et efficaces pour une utilisation durable des ressources. Quatre instituts chapeautent dix sites de recherches répartis sur le territoire suisse. Cette décentralisation permet d'optimiser la recherche en fonction des conditions climatiques diverses.

Le centre de Conthey est rattaché à l'Institut des sciences en production végétale (IPV). Il se focalise sur la culture sous serre et les cultures en région alpines, pour une intensification écologique efficace et durable. Le centre compte une cinquantaine de collaborateurs, entre scientifiques, ingénieurs agronomes et travailleurs en serre.

Les entretiens

Les entretiens avec les différents collaborateurs d'Agroscope ont été particulièrement importants pour cette recherche :

Mme Céline Gili¹, ingénieure agronome, a conseillé la technologie des serres captrices d'énergie comme synergie intéressante entre des logements et des serres et a rendu attentif aux problèmes de stockage annuel et m'a redirigé vers des études de l'Ademe.²

M. Hervé Detomasi, ingénieur agronome et responsable de la section compost à l'école d'horticulture de Lullier, a aidé à estimer les résidus de culture en serre, en donnant les références nécessaires.³

M. Robert Farinet, ingénieur agronome, groupe de recherche culture sous serre, a fait les visites Du centre de Conthey. Il a pu rendre concret certaines valeurs théoriques et m'expliquer le fonctionnement et le travail en serre.

1 du groupe de recherche culture maraichère sous serre, amélioration de l'efficacité de la production et de la qualité

2 l'Agence de l'environnement et maître de l'énergie (Ademe), en France, a collaboré au projet de Zoneterp, dans le cadre de ses études sur les serres capteur d'énergie.

3 [43] et m'a redirigé vers m.Reto Neuweiler, l'auteur, pour répondre à des questions complémentaires.

Visite des locaux¹

Les serres hydroponiques se situent dans un bâtiment annexe au centre de recherche et sont exclusivement dédiées à la culture de tomates. Elles s'organisent le long d'un couloir distributif séparant les espaces de stockage et bureau des serres. Cette proximité, alliée à une route d'accès attenante, rend la logistique particulièrement efficace.

Un porte coulissant jointée isole le climat de la serre Du reste Du couloir. Deux tailles de serres y cohabitent. Elle répondent à la succession des étapes de culture. Les plus petites sont dédiées à la culture des semis, c'est à dire, au développement des racines dans des pains de culture. Lorsqu'elles sont suffisamment ramifiées, les semis sont déplacés dans les plus grandes serres, et intégrés dans de long pains horizontaux. Ceux-ci sont reliés à un système de distribution d'eau en circuit fermé.

De longues tiges rampantes s'enroulent autour des pains de terre. Le bout est enroulé autour d'un ruban vertical d'où les fruits poussent. Il s'agit d'une technique de culture permettant une production en continu. Les fruits sont récoltés à environ 1m90 Du sol, à raison de 10 à 15 fruits chaque deux semaines et par tige. Après quoi, les tiges sont palis

sées. Les bouts qui ont été récoltés sont coupés et compostés, puis la tige est tirée et réenroulée vers le haut, le long Du ruban.

Un cycle de culture dure environ 70 jours et les serres fonctionnent onze mois par année. Les fruits commencent à pousser dès le moment où les tiges sont déroulées Du long pain horizontal. Ainsi, entre le moment où elles se déploient, à environ 40cm Du sol, jusqu'au moment où les fruits sont récoltés à environ 1m90 Du sol, quatre à cinq niveau se dessinent, Du fruit vert au fruit mûr au sommet.

Les installations de chauffage et de contrôle sont dans le couloir, à proximité directe des serres. Une chaufferie reliée à une pompe à chaleur contrôle un réseau de chauffage projetant des canalisations dans chacune des serres. La température de circulation est de 60°C et le retour est à 40°C, pour une température des serres entre 25°C et 28°C. En cas de sruchauffe, des lucarnes en toiture sont ouvertes. Un déshumidificateur contrôle le taux d'humidité. La ventilation, reliée à un réservoir de gaz carbonique extérieur, maintient le niveau de CO2 à environ 700ppm.

¹ figure 54,55

La densité des plants est d'environ 2.5 plants par mètre linéaire. Une serre de 33x13m contient huit rangées d'environ 30m de long, chacune espacée d'1m70 les unes des autres. Quatre rangées de dix lampes permettent une culture la nuit, bien qu'elle ne se fasse que rarement chez eux. Un écran thermique textile est tiré la nuit pour réduire les pertes thermiques.

Environ 200m² de pièces de 5m de profondeur sont nécessaires pour les besoins en stockage, la chaufferie centrale, et l'installation de fertilisation. Sans compter les installations accolées aux serres, le ratio est d'un peu plus de 12% de surfaces de logistique pour les quatre grandes serres et la plus petite. Mais, lors de la visite, le bâtiment était en rénovation et ils prévoient d'installer des bureaux de travail. Ainsi le large couloir était séparé en deux par des panneaux de bois et il était difficile d'estimer les surfaces réelles.

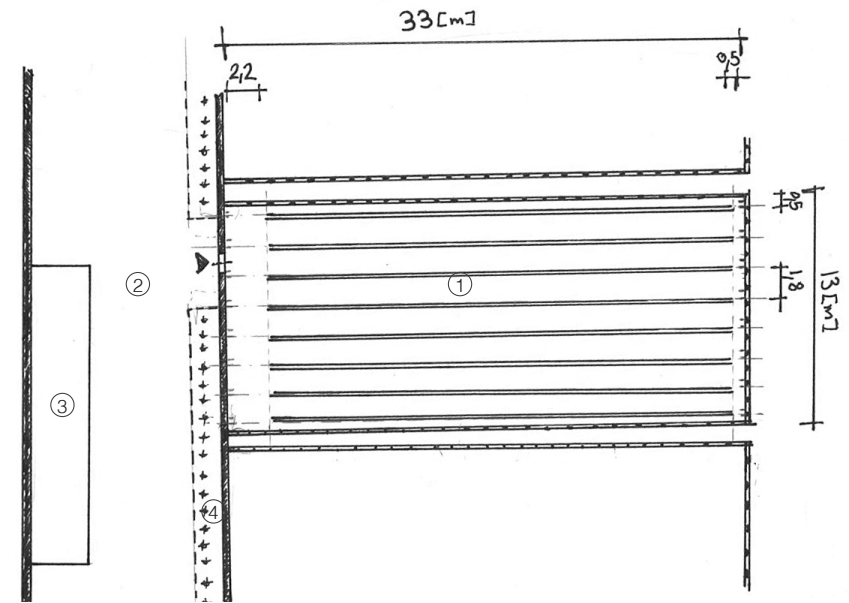


Figure 54. relevé des serres

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 1. serres avec huit rangées de plants | 3. stockage |
| 2. couloir | 4. installations de contrôle |

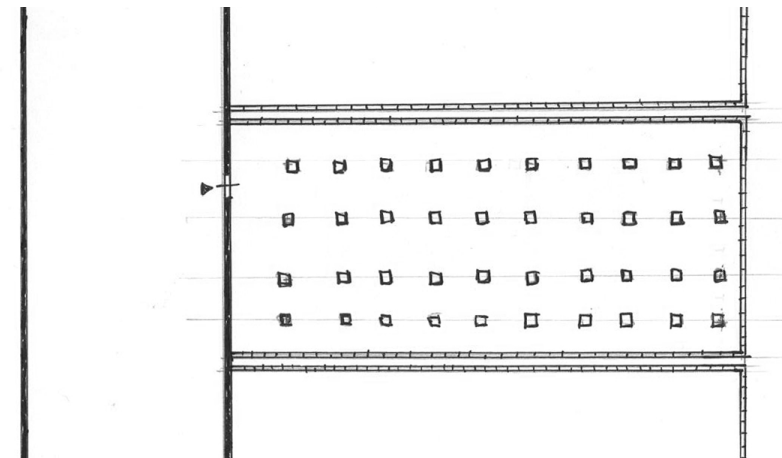


Figure 56. relevé des luminaires. quatre rangées de 10 lampes

Le travail en serre¹

De manière générale, le travail en serre ne nécessite pas de compétences particulières. Mais une supervision est nécessaire pour la gestion des installations. Le palissage, également, est une opération délicate et nécessite une certaine expérience. M.Farinet s'occupe des quatre serres, aidé par une personne. Ils gèrent ensemble un groupe d'une dizaine de personnes autonomes qui s'occupent des boutures et de la coupe des plantes.

Il y a ainsi plusieurs niveaux de responsabilité. Le chef de culture, ingénieur agronome, s'occupe de la planification générale des équipes et des cultures. Son temps de travail est partagé entre les serres et des activités de contrôle devant l'ordinateur. Il peut être assisté d'un second qui l'aide à faire le lien avec les jardiniers. Le travail en serre est divers. En début d'années, les jardiniers s'occupent de la mise en place des cultures, avec l'installation et le perçage des pains de terre horizontaux. L'entretien des cultures consiste en la récolte en serre, le calibrage et le conditionnement des produits. Comme ils sont en contact direct avec les plantes, il est important qu'ils sachent reconnaître d'éventuelles maladies ou autres problèmes.

Les conditions de travail ne sont pas spécialement difficiles, il n'y a pas de charges trop lourdes à porter et les légumes se récoltent debout. Mise à part une certaine connaissance pour le palissage qui vient rapidement avec l'expérience, le travail peut se faire sans compétences particulières. Par contre le niveau de CO₂ élevé et la température² peuvent être gênant pour certaines personnes. Des pauses à l'extérieur sont bienvenues.

¹ informations compilées entre les discussions et [54]

² le niveau de CO₂ est maintenu à 700ppm et la température varie entre 25° et 28°C

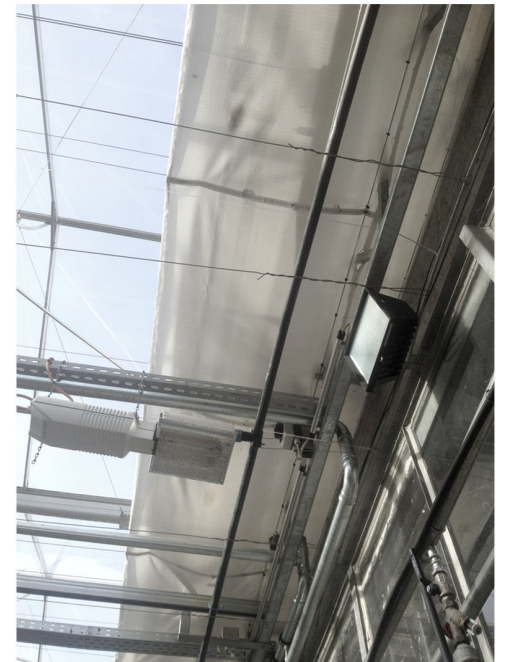


Figure 56. ambiance intérieure



7. Application sur le site d'Yverdon

7.1 Introduction au site

Situé dans une région agricole, la vallée de l'Orbe, cette petite ville de 28'000 habitants, au passé industriel, s'est détournée du lac de Neuchâtel, coupée par les rails de chemin de fer.

Le quartier gare-lac, tampon entre la gare et le lac, est un quartier aux traces industrielles. Tombé en désuétude, sa position stratégique le rend attractif pour un développement futur permettant de relier la ville aux rives du lac.¹

La correction des eaux

Durant la deuxième moitié du XIXème siècle, la correction des eaux du Jura et l'apparition des rails de chemin de fer ont coupé la ville de son bord de lac. Cette correction des eaux, en vue de réguler les niveaux des lacs et rivières, a réduit le niveau du lac de 2m. 130ha de terrain sont apparus à Yverdon. A l'est et à l'ouest d'Yverdon, une bande marécageuse borde le lac et est protégée pour sa biodiversité, tandis que les terrains au nord de la gare, d'une surface équivalente à la ville d'Yverdon, sont marqués par des affectations diverses, témoignant de la complexité de leur aménagement.

Yverdon et son territoire

La vallée conditionne fortement les axes de mobilité. L'autoroute et les rails de chemin de fer longent les flancs sud et se divisent en deux à l'encontre du lac de Neuchâtel.² Un axe de grand trafic relie Bâle et l'autre rejoint Berne. La ville d'Yverdon est donc très bien desservie par les grands axes de transport. Le réseau de route principal longe également les coteaux, libérant la vallée à l'agriculture.³ La ville d'Yverdon est contenue entre le viaduc traversant autoroutier et les rails de chemin de fer.

Située dans le plateau Suisse, langue agricole très productive, la vallée de l'Orbe est principalement agricole et la culture fourragère est majoritaire. Les coteaux ouest grimpent vers le massif du Jura, région marquée par son élevage de bétail.⁴ Le fond de la vallée est scandée par des traversées urbaines. L'une relie la commune de Chavornay à Orbe et l'autre est la ville d'Yverdon elle-même. Cette organisation en strates traversantes coupées par des axes se retrouve également au sein d'Yverdon, avec une organisation de la ville en frange et trois rivières se jetant dans le lac de Neuchâtel.

◀ Figure 57. Yverdon au XXème siècle
Carte Dufour 1ère édition

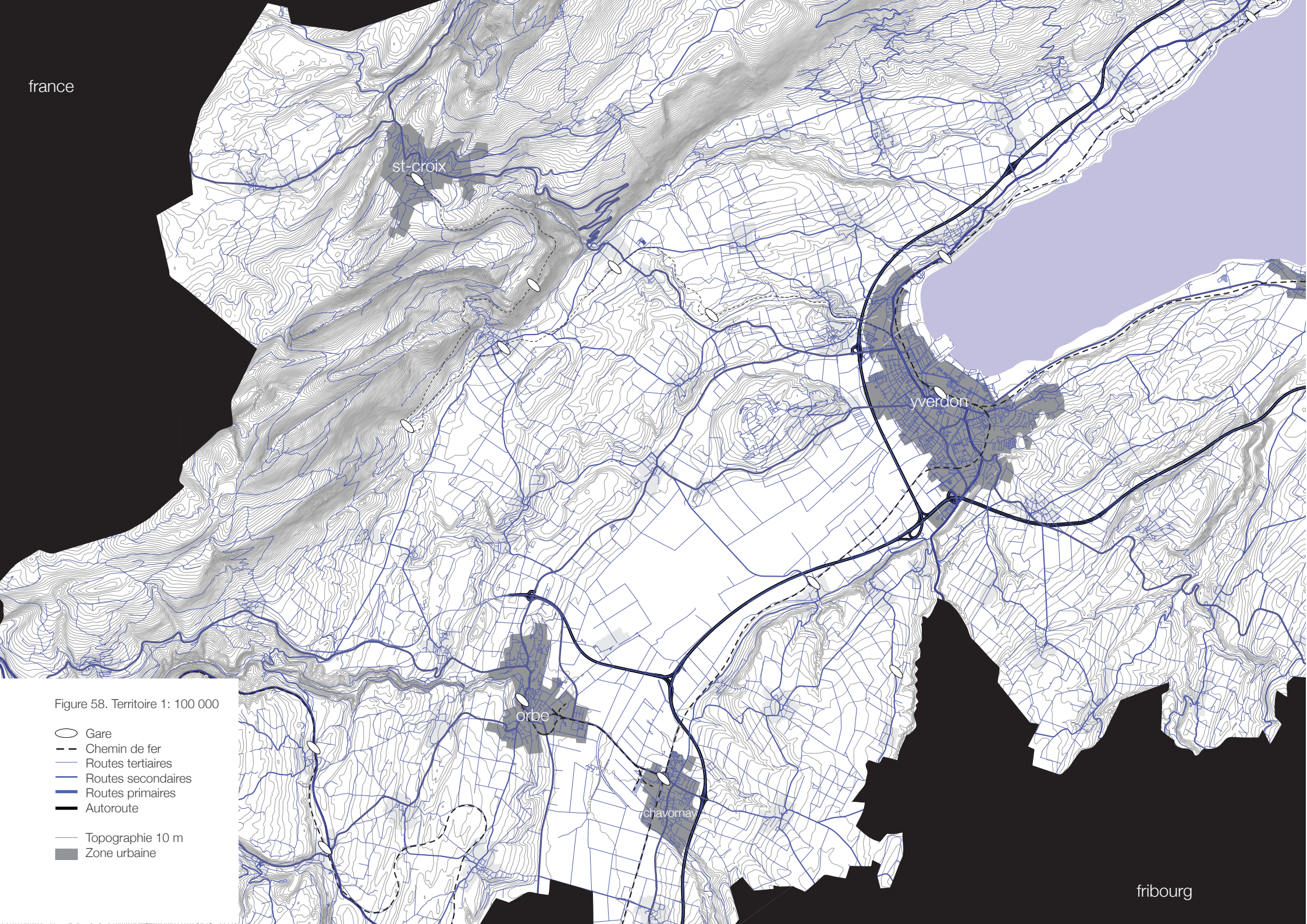
1 [20]

2 figure 58

3 figure 59

4 figure 20

france



st-croix

yverdon

orbe

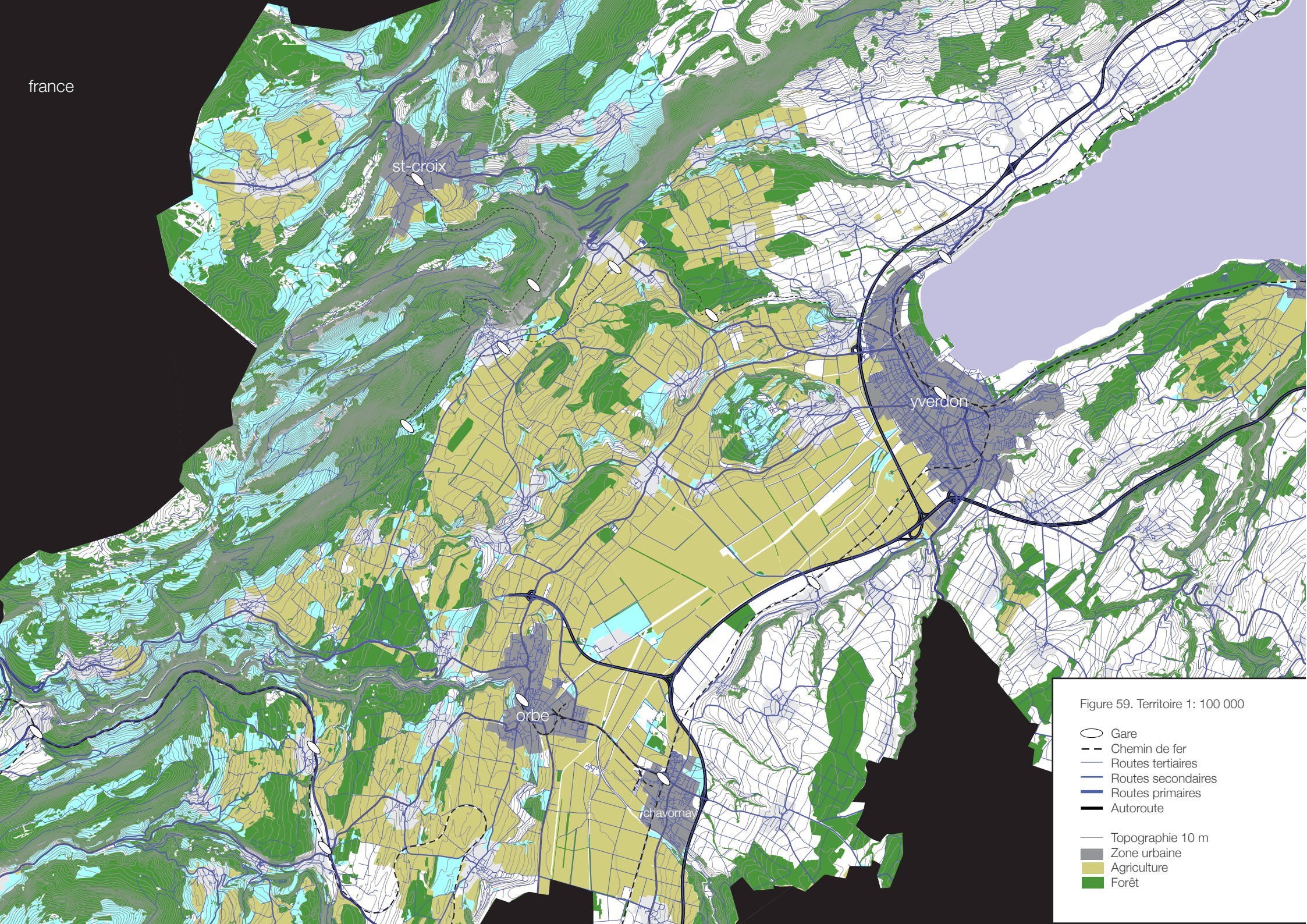
chavornay

Figure 58. Territoire 1: 100 000

- Gare
- - Chemin de fer
- Routes tertiaires
- Routes secondaires
- Routes primaires
- Autoroute
- Topographie 10 m
- Zone urbaine

fribourg

france



st-croix

yverdon

orbe

chavornay

Figure 59. Territoire 1: 100 000

- Gare
- Chemin de fer
- Routes tertiaires
- Routes secondaires
- Routes primaires
- Autoroute
- Topographie 10 m
- Zone urbaine
- Agriculture
- Forêt

Yverdon demain : le PDL gare-lac

Dans le cadre des projets de financement d'agglomération par la Confédération suisse¹, la municipalité d'Yverdon a coordonné une étude sur le développement urbain de la ville². Parmi les pôles d'intérêt, la zone Gare-Lac a séduit pour son potentiel de renouveau urbain.

Le plan directeur localisé gare-lac (PDL) s'intègre à cette étude. Il fait suite à un concours d'urbanisme³ et entend réactiver cette ancienne zone industrielle coupée de la ville par les rails de chemin de fer. Un éco-quartier de 23 hectares y est projeté et prévoit 3800 habitants et 1200 places de travail. Il est pensé de la place Pestalozzi jusqu'au lac, avec des axes de mobilité douce longeant les trois rivières et l'étude d'une nouvelle passerelle permettant de reconnecter la vieille ville au lac.

Le concept urbain reprend l'organisation en strate de la ville et densifie la frange sud Du périmètre d'intervention par un agencement d'ilôts urbains à l'endroit des friches industrielles. Ce faisant, il protège et borde de généreux espaces verts traversés par les trois rivières se jetant dans le lac. Des terrains de sports et des parcs permettront une appropriation des bords de lac.

Le PDL s'organise en plusieurs thématiques et expose des mesures allant des concepts de transports jusqu'à la protection de la biodiversité. Il s'attache particulièrement à concevoir des "espaces publics exemplaire" pour faire Du nouvel éco-quartier un "carte de visite" de la ville.

Ce faisant, le PDL vise une mixité sociale formalisée par des typologies d'habitat variés et flexibles. Des équipements communautaires sont également prévus dans certains ilôts.

Entre passé industriel et développement urbain, ce quartier engage les thèmes soulevés dans cette recherche et permet d'étudier, à la petite comme à la grande échelle, les problématiques d'approvisionnement jusqu'à la gestion des déchets.

1 "Projet d'agglomération transports et urbanisation" <http://www.ave.admin.ch/themen/agglomeration/00626/01680/index.html?lang=fr>

2 [20]

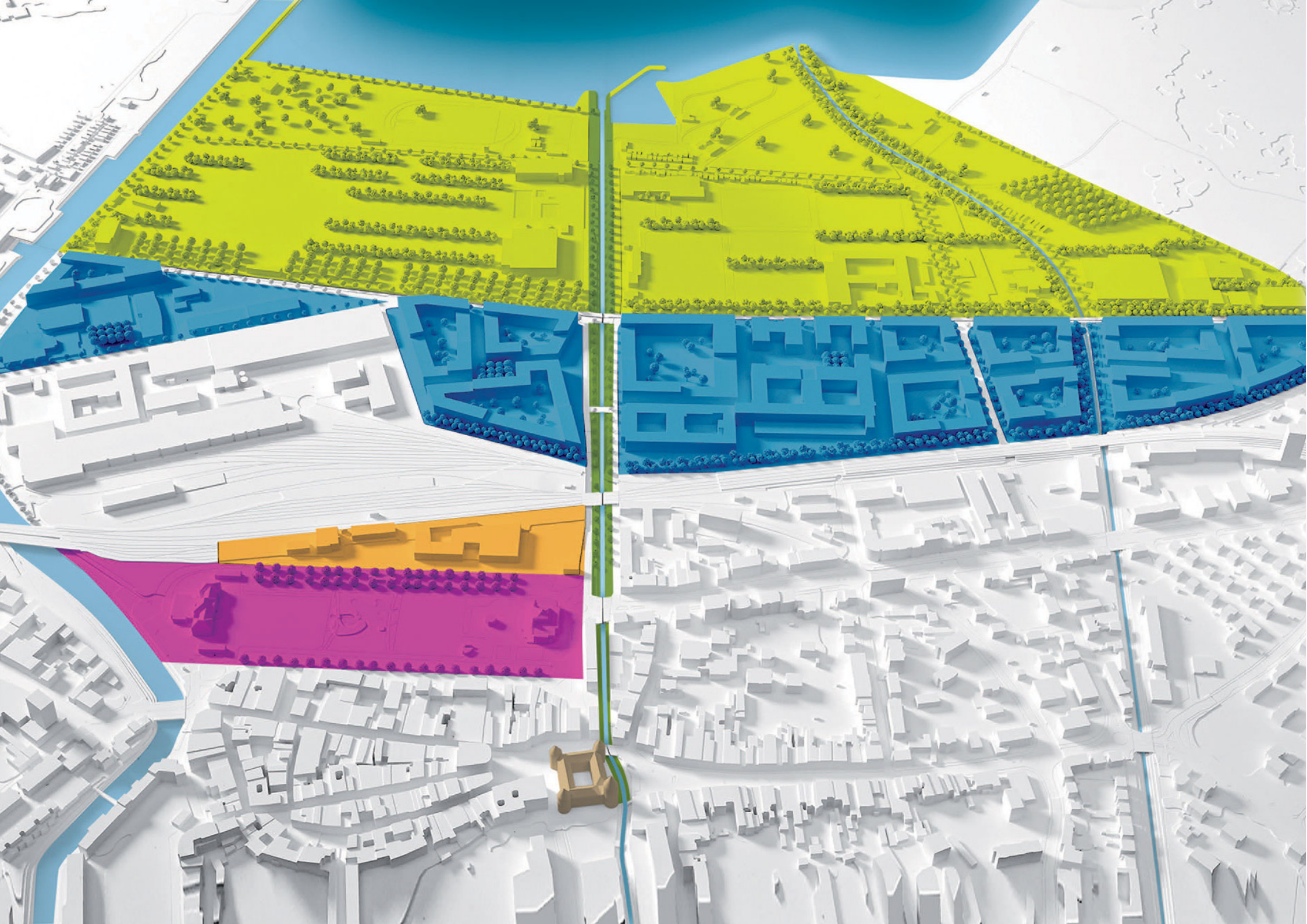
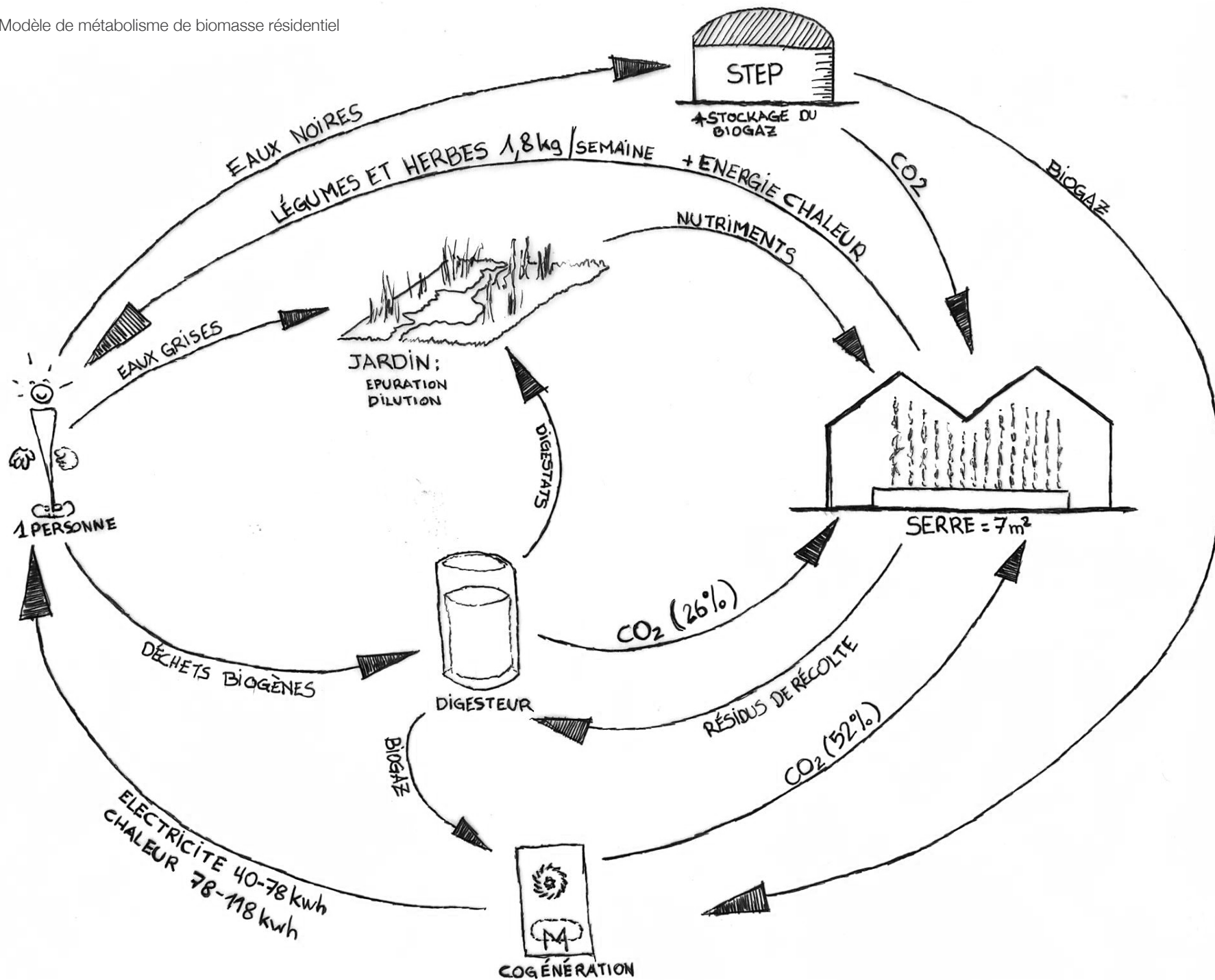


Figure 60. Modèle de métabolisme de biomasse résidentiel



7.2 Modèle théorique et ouverture vers le projet

Des flux combinés

Le travail sur une variation des flux de biomasse dessine des possibilités de synergies. Si elles n'engagent pas directement une localisation sous la forme de synergies de proximité, le cycle du carbone montre déjà des possibilités.

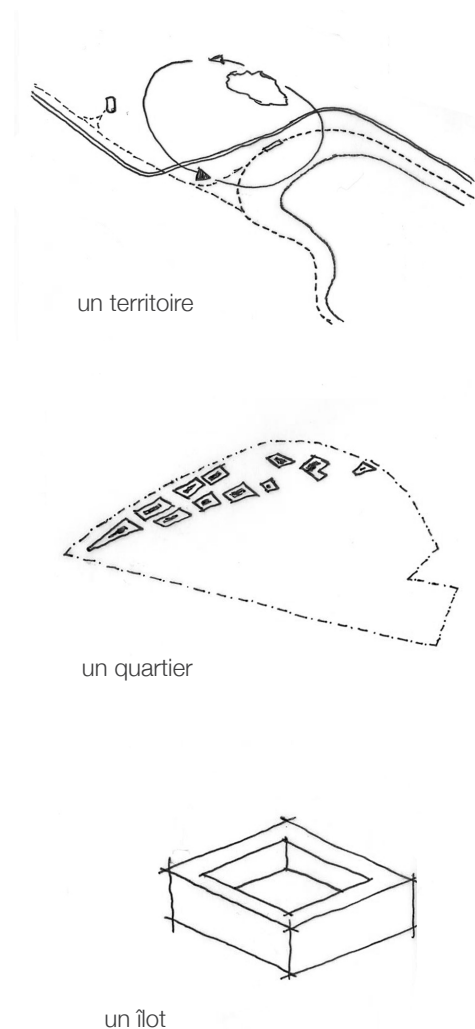
Les cas d'études ont permis d'élargir la vision en intégrant les cycles énergétiques et les cycles de l'eau. Ce faisant, ils engagent une réflexion sur les modalités de réduction de la consommation en énergie. En proposant d'intégrer des serres productives à l'habitat, ce projet révisé le scénario résidentiel et induit un travail sur les typologies architecturales. Ceci ouvre vers une réflexion énergétique basée sur une réduction de la consommation par personne par une collectivisation partielle des espaces de vie. La stratégie se couple avec la physique des serres, qui permet la capture de chaleur réchauffant les espaces adjacents. Dans une approche plus infrastructurelle, elle peut également être stockée et restituée pour une utilisation ultérieure.

Ainsi, les serres sont d'abord dimensionnées en fonction des flux de biomasse. Il s'agit de serres productives permettant une culture de légume locale. Ceci permet ensuite de générer des synergies de nutriments, de CO₂ et d'eau directement liées à une utilisation de proximité. Dans un deuxième temps, les typologies d'habitat sont étudiées pour une intégration plus fine des serres, répondant à des scénarios de vie adaptés et des synergies bio-climatiques.

Le périphérique symbiotique

Trois échelles sont définies répondant à trois types de travaux différents. Premièrement, une échelle du territoire proche permet une vision élargie des flux de biomasse. A Chavornay, une commune adjacente à Yverdon, une usine de méthanisation est en fontion. Celle-ci récolte 20 000 tonnes de déchets ménagers par année pour une production d'électricité répondant aux besoins de 1200 ménages. Ses rejets de chaleur chauffent les bâtiments industriels adjacents.

Figure 58. Trois échelles d'intervention



france

FLEURIER
10'000 t/an

st-croix

yverdon

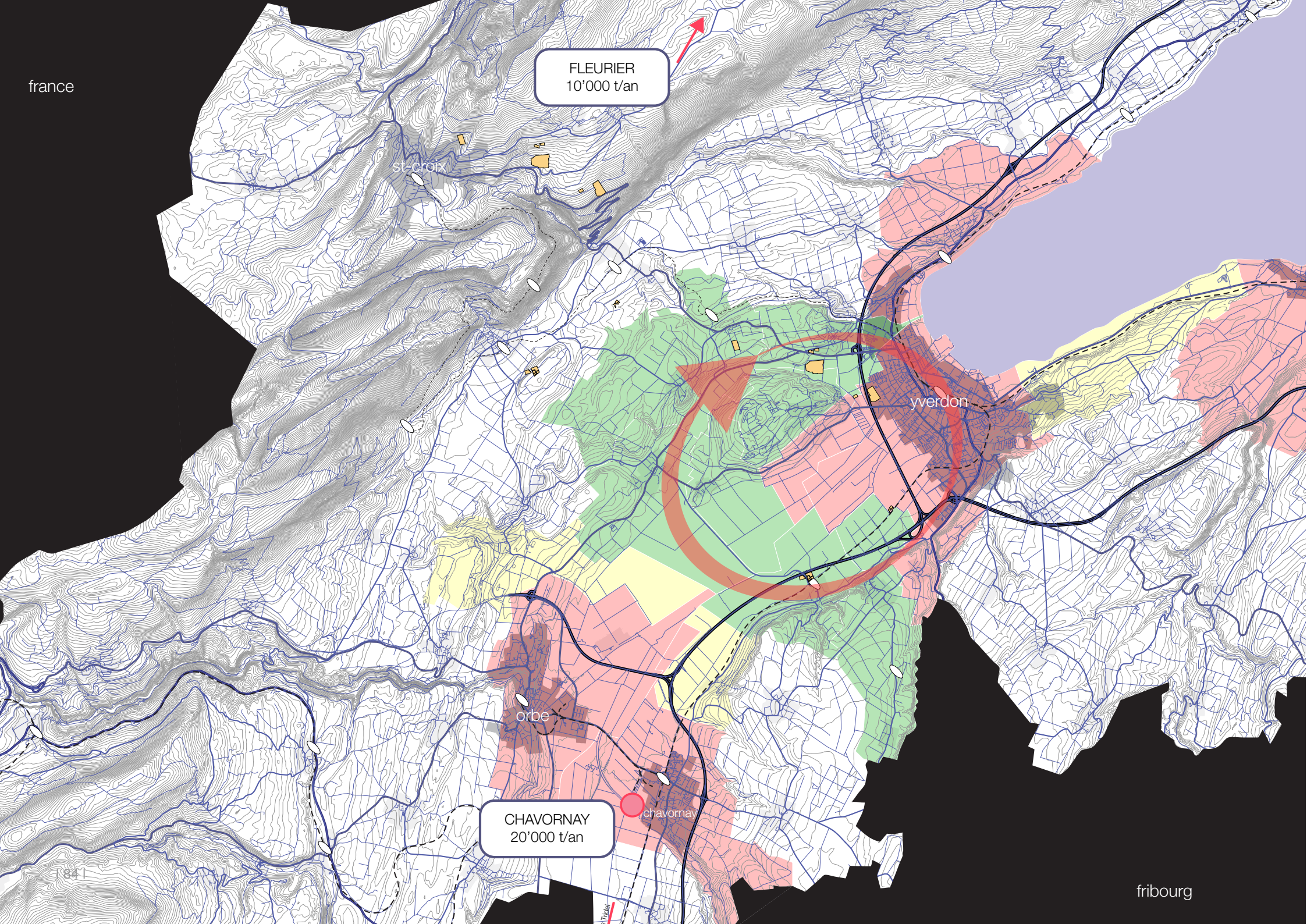
orbe

CHAVORNAY
20'000 t/an

chavornay

1841

fribourg



◀ Figure 61. Concept territorial 1: 100 000



Cette usine de méthanisation¹ récolte les déchets ménagers d'Yverdon, Orbe, Grandson et d'autres communes voisines. Les déchets sont acheminés par train. Rapportés sur le territoire, on remarque que les communes entre Chavornay et Yverdon ne sont pas desservies par l'usine.² Celles-ci n'ont pas de gare permettant l'arrêt du train.

Une route secondaire passe par ces communes,³ formant un boucle les reliant à l'éco-quartier du PDL. Plusieurs serres agricoles sont également desservies par cette route. Ainsi une forme de périphérique, incluant éco-quartier, serres et surfaces agricoles, se dessine.

Cette ceinture symbiotique élargit la vision à un territoire et ancre le projet dans une réalité infra-structurelle. Il permet également une réflexion sur un métabolisme de biomasse général et de ne pas subir le dimensionnement des infrastructures à l'échelle du quartier.

La zone gare-lac est la deuxième échelle d'intervention. Elle inclue l'éco-quartier, affecté principalement à de l'habitation et des bureaux. Son programme et sa densité sera discutée sur la base des relations de biomasse à l'échelle d'un quartier. Les serres seront ensuite incluses dans une approche aussi crédible que possible.

La nature du sol, pollué par endroit, est également un élément de projet. La deuxième strate de programmes existants est intégrée à la réflexion. Elle comprend la relation des îlots de l'éco-quartier projetés avec la STEP, la brasserie, le parc et les autres programmes situés dans la continuité vers le lac. Dans ce sens, les gabarits proposés par le PDL servent de base de réflexion et peuvent être adaptés au cours du projet.

Sur la base de cette réflexion urbaine, un îlot spécifique sera développé, en se concentrant particulièrement sur l'intégration de serre productives au bâtiment. Les typologies seront travaillées, afin d'adapter les modes d'habitat. Il peut aboutir sur plusieurs prototypes de relations. La cour intérieure, pour son potentiel de lier le voisinage par des relations de biomasse, ainsi que l'espace public adjacent reliant un îlot à un autre, fait partie de cette réflexion à plus petite échelle. Afin d'introduire une réflexion bio-climatique, un cas d'étude plus spécifique au fonctionnement des serres bio-climatique sera conduit en début de semestre.

De manière générale, le projet de semestre mettra l'accent sur le développement d'un îlot.

1 <http://www.strid.ch/fr/54>

2 figure 61

3 annexe 6



- - - Périmètre PDL
- Gabarit PDL

7.3 Intention de projet

Les synergies de biomasse permettent de tisser des liens entre les bâtiments. Mais ces liens doivent consommer le moins d'énergie possible. Le cas d'étude de Zonnekerp montre que l'eau est vecteur de nutriment et d'énergie. En prenant l'écoulement comme idée de réflexion, les flux d'eau peuvent être développés et gérés en coupe jusqu'au lac, en passant par différents programmes.

Sous cette lecture, plusieurs séquences peuvent être développées du quartier au lac.¹ Les îlots sont organisés de telle manière qu'une strate de bâtiments existants les borde dans une continuité presque directe.² Des séquences de synergies se dessinent entre les îlots projetés par le PDL et les programmes existants. Ainsi, une brasserie peut être intégrée dans une des séquences, la STEP également ou un parc.

Dans un premier temps, une lecture du quartier serait faite en se basant sur l'idée de séquences.³ A partir de quoi, des relations peuvent être tissées entre les îlots et les programmes adjacents au nord. Plusieurs possibilités sont possibles. Par exemple, une brasserie ayant besoins d'eau, on pourrait imaginer collecter les eaux de pluies et les

faire converger vers la brasserie. Le raccordement aux STEP demandent un projet de canalisations, on pourrait estimer judicieux d'installer des micro méthaniseur le long de ces canalisations et développer des séquences d'écoulement des eaux grises à partir d'elles.⁴ Un travail ouvert d'évaluation de ces synergies permettrait de définir une séquence particulièrement maîtrisable au sein de laquelle un des îlot pourrait être développé. Parallèlement à cette recherche, un cas d'étude plus précis peut être fait sur les serres bio-climatiques et les principes de synergies avec l'habitat.

Ainsi un travail préparatoire en début de semestre, consistant en un projet urbain et un cas d'étude, permettrait de se plonger avec tous les outils nécessaires dans le développement plus précis d'un îlot.

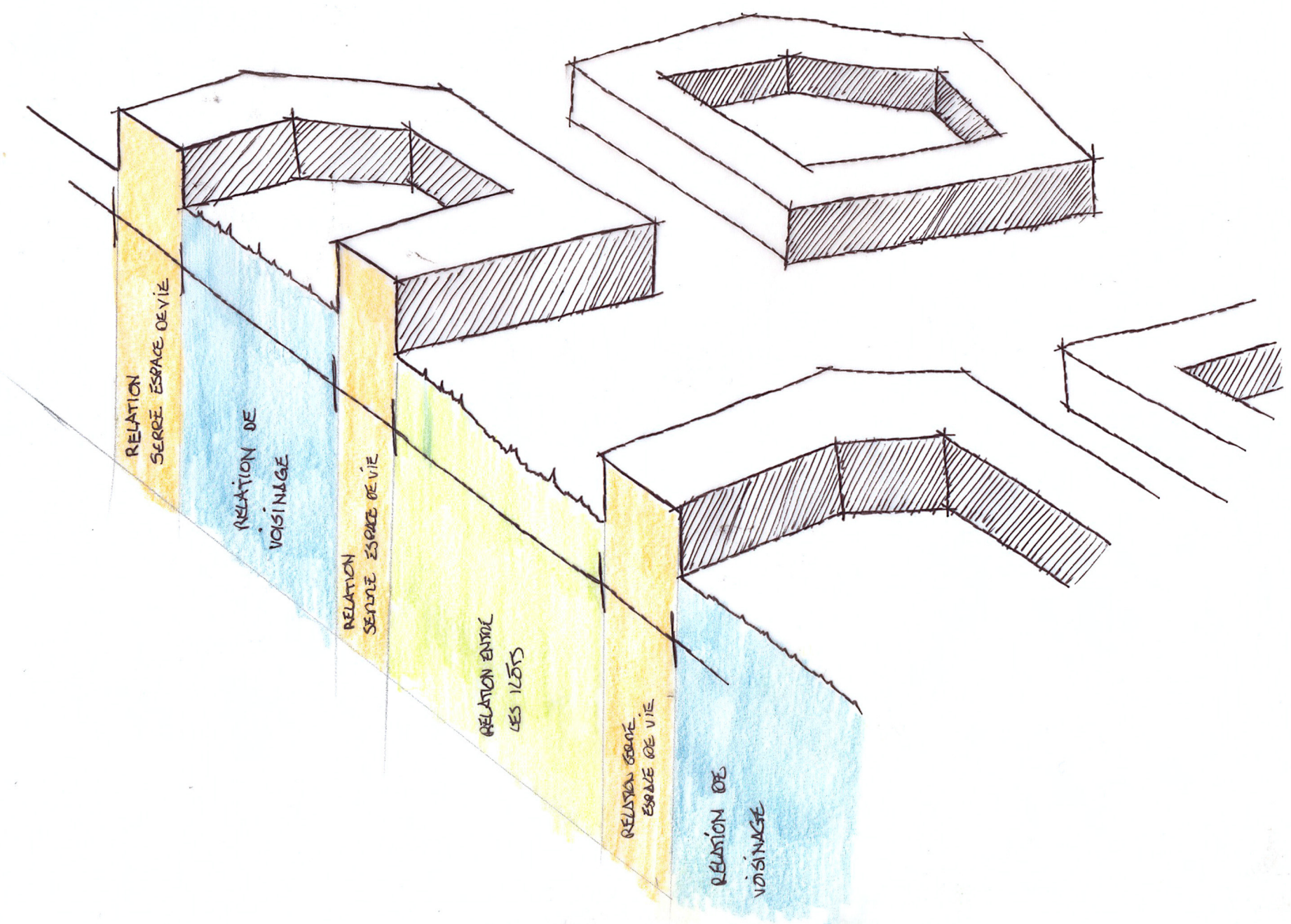
1 Figure 66

2 Figure 62

3 Figure 67

4 si nécessaire, les SIT de la commune d'Yverdon ont fournis les données relatives aux réseaux de ville

Figure 63. Relations à différentes échelles - éléments de projet



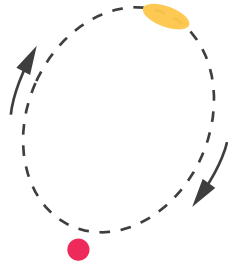


Figure 64. Le périphérique symbiotique

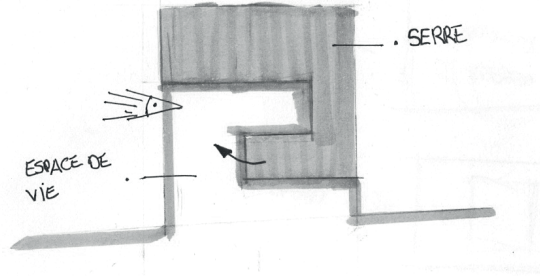


Figure 65. Travail sur les typologies - intégration des serres à l'habitat

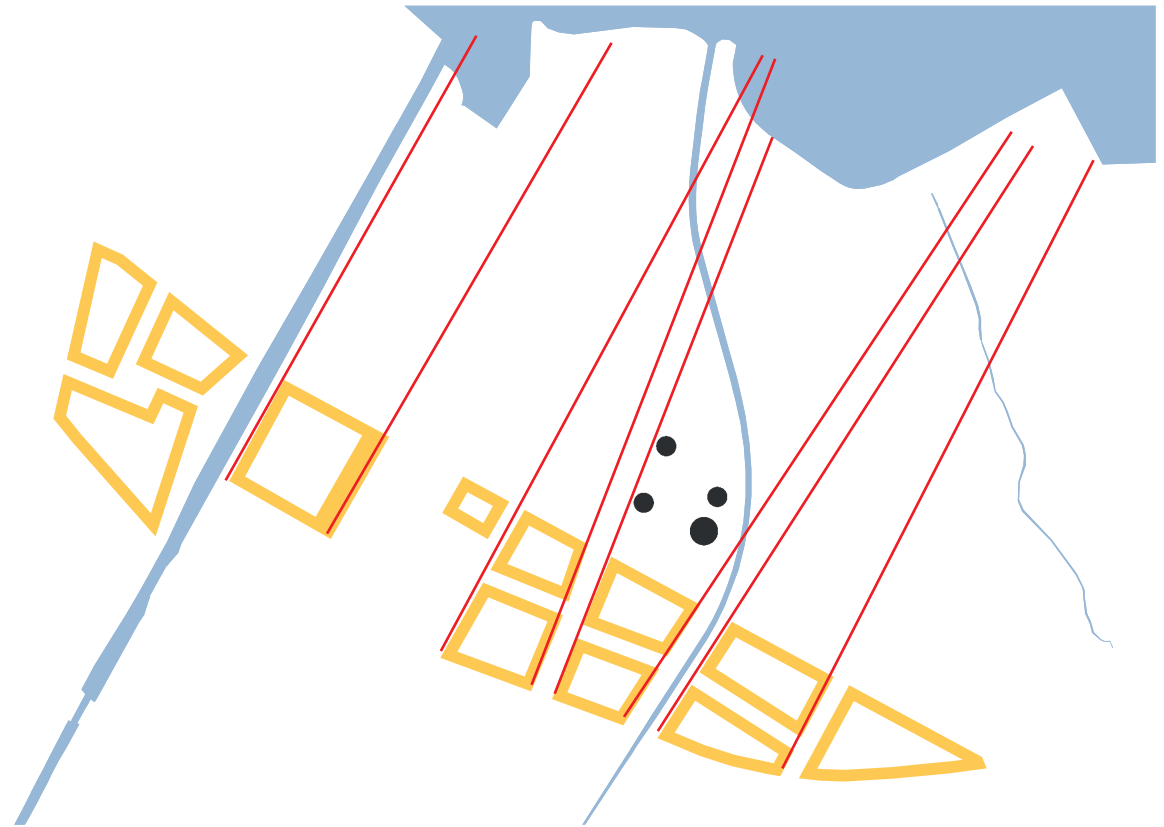


Figure 66. Synergies dans le quartier - recherche de séquences de relations (STEP, Brasserie, Parc...)

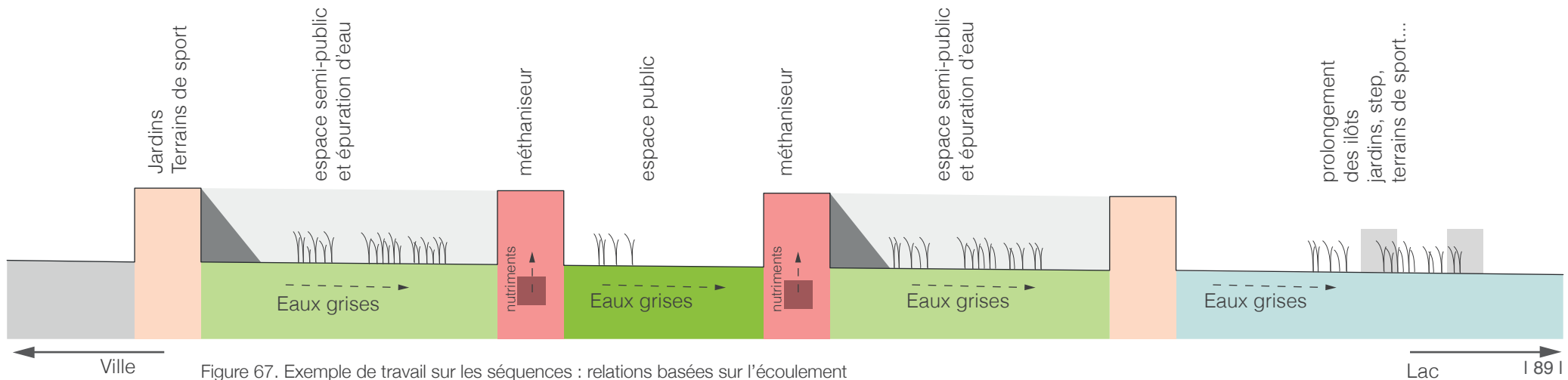


Figure 67. Exemple de travail sur les séquences : relations basées sur l'écoulement des eaux grises

Conclusion

La problématique du gaspillage des ressources a été la porte d'entrée vers une réflexion générale sur les flux de biomasse. En proposant une variante de ces flux rapportée à un habitant-type, cette recherche s'ouvre vers le projet théorique d'un métabolisme résidentiel. Si l'image donnée permet d'estimer la portée de nos modes de consommation, elle engage également des possibilités de relations relocalisées autour de l'habitat.

Entre production agricole et infrastructure de traitement des déchets, la question de l'échelle d'intervention se pose. Le territoire dans lequel s'inscrit nos flux de biomasse s'étend au-delà des frontières d'un pays. En proposant trois échelles d'intervention sur le site de projet, cette recherche rend compte de cette réalité.

Mais cette image d'un métabolisme ne permet pourtant pas seule de conduire un projet. C'est en élargissant la réflexion à d'autres cycles reliés que des relations urbaines et architecturales se tissent.

Sur la base d'une variation d'un métabolisme de la biomasse résidentiel, le projet de studio intègre les éléments nécessaires au développement d'un quartier d'habitations aux relations synergétiques permettant une utilisation plus raisonnée d'un de ses cycles de matières majeures.

Bibliographie

Générale

L.Fabian, E. Giannotti, P.Vigano. Recycling City, lifecycles, embodied energy, inclusion. Pardenone ; 2013

John Fernandez. Sustainable Urban Metabolism. Cambridge, MIT press ; 2013

Kevin Lynch. Wasting away : An Exploration of Waste: What It Is, How It Happens, Why We Fear It, How To Do It Well. Southworth ; 1991

Problématique

[1] Nicole Brändle, Christian Etzensperger, Damian Künzi, Claude Vautier. Structure de l'économie suisse de 1998 à 2020. Credit Suisse; 2010

[2] Benoît Desmarchelier. La croissance tertiaire face à la problématique environnementale une approche par les systèmes multi-agents. Thèse de doctorat. Université Lille 1; 2012.

[3] Denise Fussen, Benoît Biéler, Julien Eggenberger, Nicolas Gaschoud. Impact de l'étalement urbain. Forum environnement: développement urbain durable; 2003.

[4] Florian Kohler, Laurent Zecha, OFS. Besoins matériels de la Suisse. Statistique suisse de l'environnement N° 14. Office fédéral de la statistique (OFS); 2008

[5] Suren Erkman. Vers une écologie industrielle. Charles Léopold Mayer; 2000.

[6] N. Claire Napawan. Multi-Productive Landscapes of the Sustainable City: Opportunities for Managing Resource Needs through Urban Landscapes. University of California; 2011.

[7] Louise Skubich. Les parcs eco-industriels et leur pertinence en tant qu'application du concept de développement durable. Diplôme Institut d'Etudes Politiques de Lyon. Université de Lyon; 2008.

[8] SOFIES, Solutions For Industrial Ecosystems. Projet genevois de symbioses industrielles: Synthèse des potentiels de développement éco-industriel sur le territoire du Canton de Genève.Rapport de travail. SOFIES, Solutions For Industrial Ecosystems; 2010.

[9] Abel Wolman. The Metabolism of Cities. Scientific American; 1965.

[10] Ernst Basler+ Partner AG. RessourcenEFFizienz Schweiz REFF Grundlagenbericht zur Ressourceneffizienz und Rohstoffnutzung. Rapport de travail. Bundesamtes für Umwelt (BAFU); 2013

[11] Office fédéral de l'environnement (OFEV). Déchets: une mine d'or. environnement | 92 |

3/09; 2009.

[12] Christin Freier, Jeanette Kunsmann. Urbaner Metabolismus 2: Stadt als Ökosystem. TU Berlin; 2006.

[13] S. Erkman. Ecologie industrielle. Cours Master EPFL; 2007.

[14] Office fédéral de l'énergie OFEN. Perspectives énergétiques 2050. Confédération Suisse; 2013.

[16] B. Steubing, R. Zah, P. Waeger, C. Ludwig. Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14; 2010.

[17] Confédération Suisse. Stratégie relative à la production, la transformation et l'utilisation de biomasse en Suisse. Stratégie officielle. 2009

[18] Ernst Basler + Partner AG. Grundlagen für ein Biomasse und Nährstoffmanagement in der Schweiz. Rapport de travail. Bundesamtes für Umwelt (BAFU); 2010.

[19] Confédération Suisse. Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006. Rapport officielle; 2008.

Méthodologie

[20] Service de l'urbanisme et des bâtiments URBAT Yverdon-les-Bains et al. Yverdon-les-Bains Plan Directeur Localisé gare-lac; 2010.

[21] N. Claire Napawan. Multi-Productive Landscapes of the Sustainable City: Opportunities for Managing Resource Needs through Urban Landscapes. University of California; 2011.

Les flux de biomasse en Suisse

[22] Union Suisse des Paysans. Renforcement de l'approvisionnement en aliments concentrés d'origine suisse. Rapport du groupe de travail Fourrage ; 2011.

[23] Direction générale de l'agriculture. Le métabolisme agricole de l'agglomération franco-valdo-genevoise. Rapport officiel. République et canton de Genève; 2010.

[24] Redémarrer la Suisse. Développer des voisinages! Ropress; 2014.

[25] Adrian Moser, Claude Lüscher. Surfaces nécessaires à l'alimentation de l'agglomération bâloise mises en image. Service de géoinformation Bâle-Ville; 2013.

[26] Office fédéral de l'environnement (OFEV). Déchets: une mine d'or. environnement 3/09; 2009.

[27] Ernest Badertscher. Futur des énergies, énergies du futur, Biomasse énergie. Sympo-

sium uvss; 2011.

[28] Groupement des compostières professionnelles romandes. Du composte pour l'agriculture; 2008.

[29] Stéphane Martel. Valorisation agronomique des digestats de méthanisation. Recherche documentaire. Agrinova; 2013.

[30] Bittermann, W. Energieaufkommen und verwendung in der osterreichischen Volkswirtschaft 1995. Statistische Nachrichten 53 (2), 139–151; 1998.

[31] Helmut Haberl, Susanne Geissler. Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. Ecological Engineering 16; 2000.

[32] Table ronde france inter. Faut-il passer de l'énergie à l'exergie. Émission radio; 5 juillet 2013

[33] Maria Kelleher. Anaerobic digestion facilities in switzerland. BioCycle: Renewable Energie; octobre 2001.

Variation

[34] Jérôme Faessler. Biogaz et énergie : enjeux globaux et réalités locales. Séminaire énergie-environnement. Université de Genève; 7 mars 2013.

[35] Conseil fédéral suisse. Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD) 814.600; 10 décembre 1990.

[36] Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales du Québec. Rendement énergétique d'un digesteur anaérobie de ferme.

[37] Yves Membrez. Le biogaz, une énergie renouvelable pour les communes? Séance d'information pour les communes; 7 septembre 2010.

[38] François Marechal. Energy conversion and storage in buildings. Workshop EPFL-EIA solardecathlon; 2014.

[39] Ian Knight, Ismet Ugursal. Residential Cogeneration Systems: A Review of The Current Technologies. International Energy Agency; 2005.

[40] Martin Kaltschmitt, Dieter Merten, Nicolle Fröhlich, Moritz Nill. Energiegewinnung aus Biomasse. Externe Expertise. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU); 2003.

[41] Gilles Turcotte, Marco Rondeau, Vic Mirabella. Enrichissement carboné par récupération du CO₂ d'un système de chauffage central et stockage de chaleur. Agriréseau; 2007.

[42] Syndicat des Producteurs en Serre du Québec. La serriculture sur les toits en milieu

urbain perspectives de développement dans le contexte québécois. Agriréseau; 31 mai 2013.

[43] Reto Neuweiler. Lignes directrices de fumure en cultures maraîchères. Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW; Mars 2011.

[44] Redémarrer la Suisse. Développer des voisinages! Ropress; 2014.

[45] Institut für Gemüse und Zierpflanzenbau. Düngung im Freilandgemüsebau; Mai 2007.

[46] Exept. Polydome High Performance Polyculture Systems. Projet hollandais de serre en polyculture; 2011.

Cas d'étude

[47] de Wilt, Hübens. De Zonneterp een grootschalig zonproject. l'Innovation network for rural areas and agroclusters; 2005.

[48] N. Courtois, F. Battaglia-Brunet, M. Pettenati. Projet « Serre capteur d'énergie » application du stockage d'énergie thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraichères. Phase 1 : étude préalable des sites. Rapport BRGM; 25 juillet 2008.

[49] Ralph Thielen. Une gestion naturelle des eaux domestiques avec un prototype de toilettes à compost dans le cadre d'un projet d'habitation durable. Rapport de la phase d'étude. Coopérative d'habitation Equilibre; novembre 2011.

[50] Harrison Fraker. The hidden potential of sustainable neighborhoods. Island Press; 2013.

[51] Erik Freudenthal. Hammarby Sjöstad / unique environmental project in Stockholm. The Environmental Information Centre for Hammarby Sjöstad; 2014.

[52] Andrea Gaffney, Vinita Huang, Kristin Maravilla, Nadine Soubotin. Hammarby Sjöstad Case Study. Urban Design in Planning; 2007.

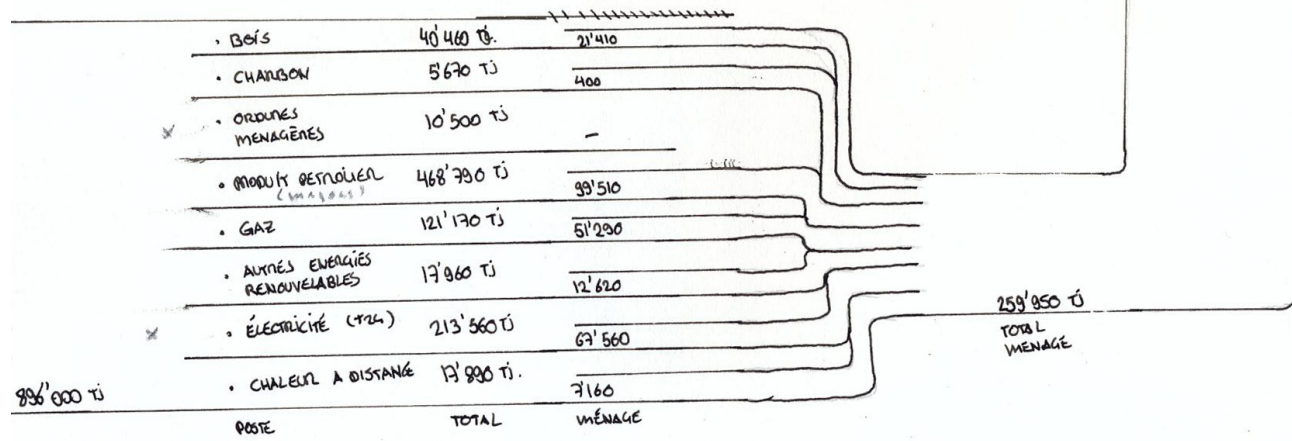
[53] Municipalité Lausanne. Hammarby Sjöstad Cité lacustre. Cas d'étude.

[54] Les Producteurs de Légumes de France. Les cultures sous serre.

Cartes

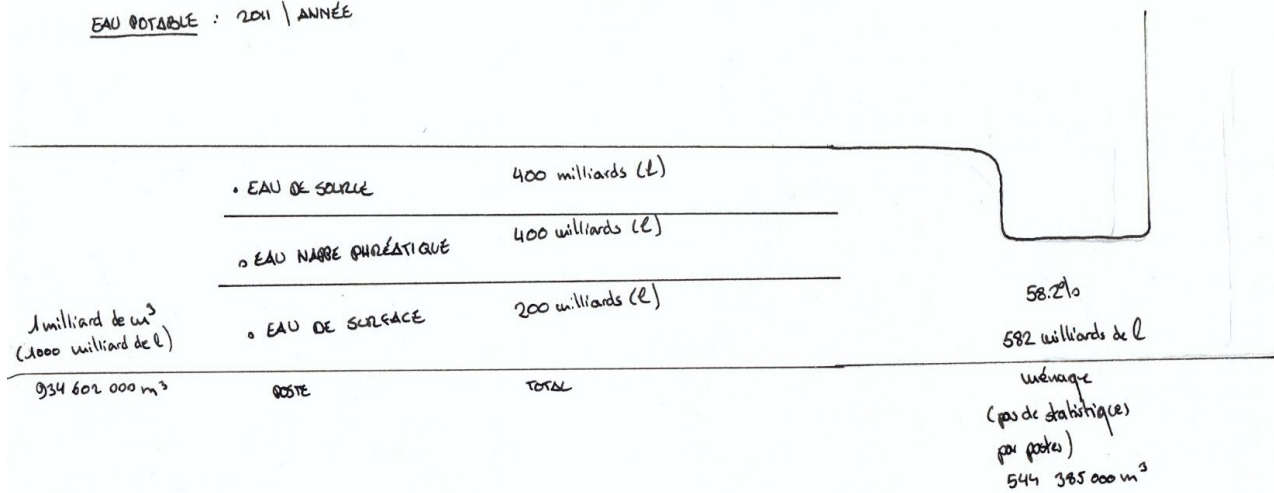
Open street map
map.geo.admin.ch
SIT Yverdon

ENERGIE : 2013 | PAR ANNEE CONSUMATION FINALE



NOTE: $936'000 - 10'500 \text{ (ORDRES MENAGÈRES)} - 213'560 \text{ (ÉLECTRICITÉ)} = 671'940$

EAU POTABLE : 2011 | ANNÉE



DÉCHETS MÉTAUX (MÉTALURGE)

DÉCHETS MÉTAUX

720 kg / habitants / année
 5460 milliers de tonnes / année

49% DANS ORGÈNES

2675.36 milliers de tonnes / an

milliers de tonnes kg/hab/année

o VIEUX PAPIER / CARTON	1324.7	176	
o DÉCHETS BIOGÈNES	930	124	
o VERRE	319.53	42	
o APPARELS ÉLECTRONIQUES	107.51	14.2	
o TEXTILES	47.5	6.3	
o BOUTELLES / RES	33.88	4.5	
o FER BLANC	13.1	1.7	
o ALUMINIUM	6.5	0.85	
o PILES	2.35	0.31	
<hr/>			
1 [	• TEXTILES	80.25	10.7
	• DÉCHETS BIOGÈNES	722.25	96.3
	• PRODUITS ORGANIQUES NATURELS	53.50	7.1
5 [4]	• MINÉRAUX	160.50	21.4
2 [	o CARTON	107	14.25
	o PAPIER	428	57
3 [	o VERRE	107	14.25
	o MÉTAUX NON FERREUX	26.75	3.55
	o MÉTAUX FERREUX	53.50	7.13
	o FRACTION RÉSIDUELLE	28.43	3.9
	o DÉCHETS SPÉCIAUX	5.35	0.7
3 [	o OBJETS COMPOSITES	574.50	75.8
	o PILES	2.675	0.35
	o APPARELS ÉLECTRONIQUES	16.05	2.14
	o COMPOSITES	107	14.25
4 [	o AUTRES PLASTIQUES	547.75	73.37
	o RÉCIPIENTS PLASTIQUES	53.50	7.1

Szenarien

Anhand von drei Szenarien wird aufgezeigt, welche Auswirkungen in der stofflichen und energetischen Verwertung der Biomasse zu erwarten wären. Im Hinblick auf aktuelle politische Diskussionen und absehbare Trends mit teils grossem Einfluss auf die Umwelt und Gesellschaft wurden im Vergleich zum Status quo (Stand 2006) drei absichtlich extrem gewählte Szenarien mit folgenden Schwerpunkten und Änderungen in den einzelnen Prozessen definiert:

	Szenario 1 Fokus stoffliche Verwertung	Szenario 2 Schliessung lokaler Kreisläufe	Szenario 3 Fokus energetische Verwertung
Stoffliche Verwertungen			
Kompostierung von Grüngut	Steigerung	Steigerung	Reduktion
Verfütterung biog. Abfälle an Schweine	Steigerung	Keine Änderung	Reduktion
Energetische Verwertungen			
Co-Vergärung in BGA	Reduktion	Steigerung	Steigerung
Co-Vergärung in ARA	Keine Änderung	Reduktion	Steigerung
Verbrennung in KVA	Reduktion	Reduktion	Reduktion
Treibstoffproduktion	Reduktion	Reduktion	Keine Änderung

Übersicht der Szenarien

Die entsprechende Umlenkung der Biomasse wurde im Stoffflussmodell modelliert. Die verschiedenen Verwertungen zugeführten Biomasse mengen wurden in Übereinstimmung mit der jeweiligen Zielrichtung gesteigert oder reduziert.

Resultate und Bewertung der Szenarien

Die ökologische und ökonomische Beurteilung zeigt, in welchen Bereichen die verschiedenen Szenarien positive oder negative Auswirkungen haben. Offensichtlich ist keines der Szenarien gegenüber dem Status Quo generell besser oder schlechter.

Resultate

Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Verschiebungen in den Stoffflüssen der 3 Szenarien im Vergleich mit dem Status quo (2006) auf. Hier wird deutlich, dass insbesondere bei der Fokussierung auf die energetische Nutzung mit massiven Verschiebungen in den Stoffflüssen der Futtermittel- bzw. Mineraldüngerimporte gerechnet werden muss. Mit dem Ziel, dass Schäden an der globalen biologischen und landschaftlichen Vielfalt durch die Nachfrage nach Importen gar nicht erst entstehen können, ist es wichtig, die Frage der Produktionsweise mit zu berücksichtigen.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Tierfutter-Import	-28%: Sämtliche bisher verbrannten Abfälle aus der Lebensmittelindustrie werden verfüttert oder in geringem Ausmass vergärt.	-1%: Die bisher verbrannten Abfälle aus der Lebensmittelindustrie werden vergärt und in den Pflanzenbau zurückgebracht.	+53%: Die bisher verbrannten Abfälle aus der Lebensmittelindustrie sowie die Hälfte der verfütterten Substrate werden vergärt.
P-Mineraldünger-Import	+0.3%: Praktisch unveränderter Bedarf an Phosphor-Importen	-24%: Gärguteinsatz in der Landwirtschaft vermindert P-Importe	-63%: Starke Zunahme an Gärgut und Presswasser, welches wieder in den Pflanzenbau zurückgeführt wird.
N-Mineraldünger-Import	+5%: Weniger Input aus der Tierhaltung	-15%: Grössere Mengen an Kompost und Gärgut verfügbar (vormals in ARA und KVA)	-48%: Mehr Presswasser und Gärgut in den Pflanzenbau
Energieproduktion	-38%: Vor allem durch Minderproduktion in KVA, auch weniger Biogasanlagen	-9%: Reduzierte Produktion in KVA wird durch Biogasanlagen nicht ganz ausgeglichen.	+192%: Erhebliche Mehrproduktion in Biogasanlagen überkompensiert Verluste in KVA

Änderungen in den Stoffflüssen der verschiedenen Szenarien

Die Veränderungen in den Güterflüssen im Vergleich zum Status quo werden in Subsystemen dargestellt. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Veränderungen im Subsystem Vergärung in Szenario 3 für den Phosphor:

A2 Quellenverzeichnis im Stan-Modell

SUBPROZESSE	NAME	FLÜSSE	GÜTEREBENE			ENERGIEEBENE			PHOSPHOREBENE			STICKSTOFFEBENE					
			kt TS/ Jahr 2006	TK	Quellen	Gwh / Jahr 2006	TK	Heizwert Hu in Mwh/t	Quellen	t TS/ Jahr 2006	TK	Konzentr. in g/kg TS	Quellen	t TS/ Jahr 2006	TK	Konzentr. in g/kg TS	Quellen
Pflanzenbau																	
IN	Pflanzenumgebung	INP1-PFL INP2-PFL KMP-PFL VGÄ1-PFL VGÄ2-PFL LMI-PFL THA-PFL VBR-PFL PRP-PFB	Mineraldünger u.a. andere Einträge: Deposition, u.a. Kompost Presswasser & Gärgut Klärschlamm ausgefault Verarbeitungsreste Hofdünger Asche Ernterückstände	(n.b.) (n.b.) 148 35 21 6 2'606 0 314 3'130		[22] [21], [2], [37] [2] [36], [8] [34], [29], [34] [27] [35]	(n.b.) (n.b.) 699 145 84 29 11'468 0 1'482 13'907		4.72 [5] 4.20 [56] 4.00 [54] 4.85 rechn. aus [5] 4.40 [5] 0.00 4.72 rechn. aus [5]		5'860 378 459 325 488 7 20'337 0 1'068 28'719		rechn. aus [40] [40] 3.1 [26] 9.4 rechn. (STAN) 23.3 rechn. (STAN) 1.1 [12] 7.8 [34] 0.0 3.4 rechn. (antellig)	49'388 64'855 2'473 1'116 592 35 124'911 0 5'463 248'633		rechn. aus [40] [40] 16.7 [26] 32.3 rechn. (STAN) 28.3 rechn. (STAN) 5.8 [12] 47.9 [34] 0.0 17.4 rechn. (antellig)	
OUT	Pflanzenumgebung	PFB-PRP PFL-OUT	Pflanzenaufnahme Überschuss Pflanzenbau	7'897 (n.b.)		[5]	37'844 (n.b.)	4.79	rechn. (STAN)	26'381 2'338 28'719		3.3 rechn. (STAN)	145'117 103'516 248'633		18.4 rechn. (STAN)	rechn. (STAN)	
IN	Produzierte Pflanzen	PFB-PRP	Pflanzenaufnahme	7'897		[5]	37'844	4.79	rechn. (STAN)	26'381		3.3 rechn. (STAN)	145'117		18.4 rechn. (STAN)		
OUT	Produzierte Pflanzen	PRP-PFB PFL-THA PFL-LMI PFL-VGÄ PFL-VTR	Ernterückstände Futterpflanzen Pflanzen für Ernährung Energiepflanzen Energiepflanzen	314 6'632 948 2 1 7'897	0.040 [35] 0.840 [34] 0.120 [34], [44] 0.000 [29] 0.000 [29]	[35]	1'482 31'436 4'910 7 7 37'844	4.72 4.74 5.18 4.72 6.45	rechn. aus [5] rechn. aus [5] rechn. aus [5] rechn. aus [5] rechn. aus [5]	1'068 22'549 2'749 8 7 26'381		3.4 3.4 2.9 4.1 7.2 [15]	5'463 124'021 15'545 49 38 145'117		17.4 18.7 16.4 25.0 36.8 [11]	antellig aus [12] antellig aus [12] antellig aus [12] [30] [11]	
Tierhaltung																	
IN	Tierfutter	INP-THA PFL-THA FLV-THA WAK-THA LMI-THA VTR-THA TIE-TIF	Netto-Import Tierfutter Futterpflanzen Tierische Nebenprodukte biogene Abfälle Verarbeitungsreste Presskuchen Futtermilch	666 6'632 16 28 634 0 78 8'055		[34], [14] [34] [18] [32], [3] [19] [5] [34]	3'145 31'436 75 117 2'644 1 488 37'906	4.72 [34], [14] 4.74 rechn. aus [5] 4.72 [5] 4.17 [5] 4.17 rechn. aus [5] 2.07 rechn. (STAN) 6.25 [5]		6'177 22'549 139 109 2'219 7 585 31'786		9.3 [40] 3.4 antellig aus [12] 8.7 [30] 3.9 [30] 3.5 [30] 15.3 rechn. (STAN) 7.5 rechn. (STAN)	35'821 124'021 895 785 12'680 38 3'448 177'687		53.8 [40] 18.7 antellig aus [12] 56.0 [42] 28.0 [56] 20.0 [56] 78.3 [30], [7] 44.2 rechn. (STAN)		
OUT	Tierfutter	TIF-TIE	Fütterung	8'055		[34]	37'906	4.71	rechn. aus [5]	31'786		3.9 rechn. (STAN)	177'687		22.1 rechn. (STAN)		
IN	Nutztiere	TIF-TIE	Fütterung	8'055		[34]	37'906	4.71	rechn. aus [5]	31'786		3.9 rechn. (STAN)	177'687		22.1 rechn. (STAN)		
OUT	Nutztiere	THA-FLV THA-LMI TIE-THOD TIE-TIF THA-OUT	Schlachtvieh & Kadaver Milch, Eier, Honig Hofdünger Futtermilch Veratmung, Emissionen u.a.	214 409 2'617 78 4'738 8'055	0.027 [23], [24], [43], [3] 0.051 [34] 0.325 [28], [34], [29] 0.010 [34] 0.590 rechn. (STAN)	[23], [24], [43], [3]	1'069 2'554 11'514 488 22'282 37'906	5.00 [5] 6.25 rechn. aus [5] 4.40 rechn. (STAN) 6.25 [5] 4.70 rechn. (STAN)		3'804 3'065 20'419 585 3'913 31'786		17.8 rechn. (STAN) 7.5 antellig aus [12] 7.8 [34] 7.5 rechn. (STAN) 7.5 rechn. (STAN)	14'908 18'286 125'390 3'448 15'676 177'687		69.7 rechn. (STAN) 44.7 antellig aus [12] 47.9 [34] 44.2 rechn. (STAN) 45.8 rechn. (STAN)		
IN	Triage Hofdünger	TIE-THOD	Hofdünger	2'617		[28], [34], [29]	11'514	4.40	rechn. (STAN)	20'419		7.8 [34]	125'390		47.9 [34]		
OUT	Triage Hofdünger	THA-PFL THA-VGÄ	Hofdünger Hofdünger	2'606 10 2'617	0.996 [34], [29], [34] 0.004 [34], [29], [34]	[34], [29], [34]	11'468 46 11'514	4.40 [5] 4.40 [5]		20'337 82 20'419	0.996 0.004	7.8 rechn. (STAN) 7.8 rechn. (STAN)	124'911 479 125'390	0.996 0.004	47.9 rechn. (STAN) 45.8 rechn. (STAN)		
Lebensmittelindustrie																	
IN	Sammlung unverarb. LM	INP-LMI PFL-LMI THA-LMI	Netto-Import Lebensmittel Pflanzen für Ernährung Milch, Eier, Honig	1'352 948 409 2'709		[14], [34] [34], [44] [34]	7'344 4'910 2'554 14'808	5.43 [14], [34] 5.18 rechn. aus [5] 6.25 rechn. aus [5]		2'705 2'749 3'065 8'519		2.0 antellig aus [12] 2.9 antellig aus [12] 7.5 antellig aus [12]	16'636 15'545 18'266 50'447		12.3 antellig aus [12] 16.4 antellig aus [12] 44.7 antellig aus [12]		
OUT	Sammlung unverarb. LM	SUVL-VLM	unverarbeitete Lebensmittel	2'709		rechn. (STAN)	14'808	5.47	rechn. (STAN)	8'519		3.1 rechn. (STAN)	50'447		18.6 rechn. (STAN)		
IN	Verarbeitung LM	SUVL-VLM	unverarbeitete Lebensmittel	2'709		rechn. (STAN)	14'808	5.47	rechn. (STAN)	8'519		3.1 rechn. (STAN)	50'447		18.6 rechn. (STAN)		
OUT	Verarbeitung LM	LMI-THA LMI-PFL LMI-KMP LMI-VGÄ LMI-WAK LMI-ARA LMI-VBR	Verarbeitungsreste Verarbeitungsreste Verarbeitungsreste Verarbeitungsreste Vegetarische Lebensmittel Abwasser Verarbeitungsreste	634 6 21 17 1'806 90 135 2'709	0.234 [19] 0.002 [36], [8] 0.008 [22], [37] 0.006 [22], [37] 0.667 [41], [34] 0.033 [4], [25], [45] 0.050 [19]	[19] [8] [37] [37] [41], [34] [4], [25], [45] [19]	2'644 29 99 80 10'186 1'202 568 14'808	4.17 rechn. aus [5] 4.85 rechn. aus [5] 4.72 [5] 4.72 [5] 5.64 antellig aus [5] 13.35 rechn. (STAN) 4.21 rechn. aus [5]		2'219 7 65 60 4'515 1'235 419 8'519		3.5 [30] 1.1 [12] 3.1 entspr. Input 3.5 [56] 2.5 antellig aus [12] rechn. (STAN) 3.1 entspr. Input	12'680 35 391 316 294'38 5'076 2'511 50'447		20.0 [56] 5.8 [12] 18.6 entspr. Input 18.6 entspr. Input 16.3 antellig aus [12] rechn. (STAN) 18.6 entspr. Input		

SUBPROZESSE	NAME	FLÜSSE	GÜTEREBENE			ENERGIEEBENE			PHOSPHOREBENE			STICKSTOFFEBENE						
			kt TS/ Jahr 2006	TK	Quellen	Gwh / Jahr 2006	TK	Heizwert Hu in Mwh/t	Quellen	t TS/ Jahr 2006	TK	Konzentr. in g/kg TS	Quellen	t TS/ Jahr 2006	TK	Konzentr. in g/kg TS	Quellen	
Fleischverarbeitung																		
IN	Schlachthof	THA-FLV	Schlachtvieh & Kadaver	214		[23], [24], [43], [3]	1'069		5.00	[5]	3'804		17.8	rechn. (STAN)	14'908		69.7	rechn. (STAN)
OUT	Schlachthof	FLV-THA	Tierische Nebenprodukte	16	0.075	[18]	75		4.72	[5]	139		8.7	[30]	895		56.0	[42]
		SHO-SFFV	Schweizer Fleisch	70	0.327	[34]	350		5.00	rechn. (STAN)	643		9.2	Mittel aus [12]	8'951		128.0	Mittel aus [12]
		FLV-VGÄ	Tierische Nebenprodukte	2	0.009	[29]	10		5.00	[5]	17		8.7	[30]	112		56.0	[42]
		FLV-VBR	Tierische Nebenprodukte	65	0.304	[39], [16], [42]	422		6.49	rechn. aus [5]	1'300		20.0	[39]	4'050		62.0	[39]
		FLV-OUT	Export Knochen u.a. Output	61	0.285	[39], [17]	212		3.48	rechn. (STAN)	1'705		28.0	[39]	900		14.8	[39]
				214			1'069				3'804				14'908			
IN	Sammlung Fleisch	SHO-SFFV	Schweizer Fleisch	70		[34]	350		5.00	rechn. (STAN)	643		9.2	Mittel aus [12]	8'951		128.0	Mittel aus [12]
		INP-FLV	Netto-Import Fleischwaren	32		[14], [34]	160		5.00	[5]	295		9.2	[12]	4'105		128.0	[12]
				102			510				938				13'056			
OUT	Sammlung Fleisch	FLV-WAK	Fleischwaren	102		[34], [9]	510		5.00	[5]	938		9.2	Mittel aus [12]	13'056		128.0	Mittel aus [12]
Warenkonsum																		
IN	Nahrung Mensch	LMI-WAK	Vegetarische Lebensmittel	1'806		[41], [34]	10'186		5.64	anteilig aus [5]	4'515		2.5	anteilig aus [12]	29'438		16.3	anteilig aus [12]
		FLV-WAK	Fleischwaren	102		[34], [9]	510		5.00	[5]	938		9.2	Mittel aus [12]	13'056		128.0	Mittel aus [12]
				1'908			10'696				5'453			42'494				
OUT	Nahrung Mensch	NAM-TKOA	Gastroabfälle / Lebensmittelreste	76	0.040	[38]	345		4.52	rechn. (STAN)	298		3.9	[30]	2'137		28.0	[56]
		NAM-SABW	Abwasser	247	0.129	[31]	1'166		4.72	[5]	3'602		14.6	rechn. (STAN)	26'000		105.3	rechn. (STAN)
		WAK-VBR	biogener Anteil Kehricht	243	0.127	[14], [2], [10]	979		4.03	rechn. aus Input	899		3.7	entspr. Input	10'957		45.1	rechn. (STAN)
		WAK-OUT	Veratmung, Mensch, Verluste	(n.b.)	0.582	rechn. (STAN)	(n.b.)		6.12	rechn. (STAN)	654	0.12	0.5	entspr. TIE	3'400	0.08	2.5	entspr. TIE
										5'453				42'494				
IN	Triage komm. Abfuhr & Grüngut	NAM-TKOA	Gastroabfälle / Lebensmittelreste	76		[38]	345		4.52	rechn. (STAN)	298		3.9	[30]	2'137		28.0	[56]
		INP2-WAK	Grüngut GALA-Bau & privat	225		[38]	1'082		4.72	rechn. aus Input	563		2.5	[13], [30], [56]	2'250		10.0	[13], [30], [56]
				301			1'407				860				4'387			
OUT	Triage komm. Abfuhr & Grüngut	WAK-THA	biogene Abfälle	28	0.0929	[32], [3]	117		4.17	[5]	109		3.9	[30]	785		28.0	[56]
		WAK-KMP	biogene Abfälle	233	0.7743	[22], [37]	1'101		4.72	[5]	560		2.4	rechn. (STAN)	3'265		14.0	rechn. (STAN)
		WAK-VGÄ	biogene Abfälle	40	0.1327	[22], [37]	189		4.72	[5]	191		4.8	rechn. (STAN)	337		8.4	rechn. (STAN)
				301			1'407				860			4'387				
IN	Sammlung Abwasser	NAM-SABW	Abwasser	247		[31]	1'166		4.72	[5]	3'602		14.6	rechn. (STAN)	26'000		105.3	rechn. (STAN)
		INP1-WAK	nicht-biogene Konsumgüter	0							498			rechn. (STAN)	0			
				247			1'166				4'100				26'000			
OUT	Sammlung Abwasser	WAK-ARA	Abwasser	247	1.000	rechn. (STAN)	1'166		4.72	[5]	4'100			[31]	26'000			[31]
Kompostierung																		
IN		LMI-KMP	Verarbeitungsreste	21		[22], [37]	99		4.72	[5]	65		3.1	entspr. Input	391		18.6	entspr. Input
		WAK-KMP	biogene Abfälle	233		[22], [37]	1'101		4.72	[5]	560		2.4	rechn. (STAN)	3'265		14.0	rechn. (STAN)
		VGÄ-KMP	festes Gärgut	3		[37]	13		4.50	[5]	19		6.6	rechn. (STAN)	89		30.0	rechn. (STAN)
				257			1'213				644				3'744			
OUT		KMP-PFL	Kompost	148	0.576	[22]	699		4.72	[5]	459		3.1	[26]	2'473		16.7	[26]
		KMP-OUT2	Kompost GALA-Bau & Privat	58	0.225	[22]	273		4.72	[5]	185		3.2	[26]	863		14.9	[26]
		KMP-OUT1	Rotteverlust	51	0.199	rechn. (STAN)	241		4.71	rechn. (STAN)	0		0.0	rechn.	409		8.0	rechn.
				257			1'213				644			3'744				
ARA																		
IN	Abwasserbehandlung	INP-ARA	Abwasser andere Industrien	110		[31]	519		4.72	[5]	400			[31]	5'000			[31]
		LMI-ARA	Abwasser	90		[4], [25], [45]	1'202		13.35	rechn. (STAN)	1'235			rechn. (STAN)	5'076			rechn. (STAN)
		WAK-ARA	Abwasser	247		rechn. (STAN)	1'166		4.72	[5]	4'100			[31]	26'000			[31]
				447			2'887				5'735				36'076			
OUT	Abwasserbehandlung	ARA-OUT	Emissionen, gereinigtes Abwasser	160	0.358	rechn. (STAN)	1'531		9.58	rechn. (STAN)	573	0.1		[39]	29'582	0.82		[33]
		ABB-TROH	Rohschlamm	287	0.642	[5]	1'356		4.72	rechn. (STAN)	5'161	0.9		[39]	6'494	0.18		[33]
				447			2'887				5'735				36'076			
IN	Triage Rohschlamm	ABB-TROH	Rohschlamm	287		[5]	1'356		4.72	rechn. (STAN)	5'161		18.0	[39]	6'494		22.6	
OUT	Triage Rohschlamm	ARA-VGÄ	Rohschlamm	258	0.900	[56]	1'220		4.72	[5]	4'387	0.85	17.0	[54]	5'520	0.85	21.4	[54]
		ARA-VBR	Rohschlamm	29	0.100	[56]	136		4.72	[5]	774	0.15	27.0	[54]	974	0.15	33.9	[54]
				287			1'356				5'161				6'494			

SUBPROZESSE	NAME	FLÜSSE	GÜTEREBENE			ENERGIEEBENE				PHOSPHOREBENE				STICKSTOFFEBENE			
			kt TS/ Jahr	TK	Quellen	Gwh / Jahr	TK	Heizwert Hu in Mwh/t	Quellen	t TS/ Jahr	TK	Konzentr. in g/kg TS	Quellen	t TS/ Jahr	TK	Konzentr. in g/kg TS	Quellen
			2006			2006				2006			2006				
Vergärung																	
IN	Triage Cosubstrate	WAK-VGÄ LMI-VGÄ VTR-VGÄ FLV-VGÄ	biogene Abfälle Verarbeitungsreste Glycerin Tierische Nebenprodukte	40 17 0 2	[22], [37] [22], [37] [56] [29]	189 80 4.72 10	4.72 4.72 4.72 5.00	[5] [5] [5] [5]		191 60 0 17	4.8 3.5 0.1 8.7	rechn. (STAN) [56] [30] [30]	337 316 0 112	8.4 18.6 0.1 56.0	rechn. (STAN) entspr. Input [30] [42]		
OUT	Triage Cosubstrate	TSUB-FAU TSUB-BGA	Biogas-Substrate Biogas-Substrate	3 56	0.050 [56] 0.950 [56]	14 266	4.73 4.73	[54] [54]		13 255	0.05 0.95	4.5 4.5	[54] [54]	38 727	0.05 0.95	12.9 12.9	[54] [54]
				59		280				268			766				
IN	FAU	ARA-VGÄ TSUB-FAU	Rohschlamm Biogas-Substrate	258 3	rechnerisch [56]	1'220 14	4.72 4.73	[5] [54]		4'387 13	17.0 4.5	[54] [54]	5'520 38	21.4 12.9	[54] [54]		
				261		1'234				4'401			5'558				
OUT	FAU	VGÄ1-VBR VGÄ-OUT VGÄ2-PFL FAU-TBGA FAU-SVGP	Klärschlamm ausgefault Klärschlamm Deponie, Ausland Klärschlamm ausgefault Biogas Verluste	158 1 21 77 4	0.6054 [2] 0.0038 [2] 0.0802 [2] 0.2950 [25] 0.0156 rechn. (STAN)	656 15 84 455 24	5.32 0.012 0.068 5.90	[54] [54] [54] [5] rechn. (STAN)		3'824 88 0 488 0	0.870 0.019 23.3	24.2 [55] [55] [55] 0	4'636 103 592 4 222	0.842 0.005 0.112 0.1 0.040	29.3 [55] [55] [55] [56]		
IN	BGA	TSUB-BGA THA-VGÄ PFL-VGÄ	Biogas-Substrate Hofdünger Energiepflanzen	56 10 2	[56] [34], [29], [34] [29]	266 46 9	4.73 4.40 4.72	[54] [5] rechn. aus [5]		255 82 8	4.5 7.8 4.1	[54] rechn. (STAN) [30]	727 479 49	12.9 45.8 25.0	[54] rechn. (STAN) [30]		
OUT	BGA	BGA-TBGA VGÄ1-PFL VGÄ-KMP BGA-SVGP	Biogas Presswasser & Gärgut festes Gärgut Verluste	28 35 3 4	0.401 [25] 0.504 [21], [2], [37] 0.043 [37] 0.052 rechn. (STAN)	162 145 13 0	5.90 4.20 4.50 0.05	[5] [56] [5] rechn. (STAN)		0 325 19 0	0 9.4 6.6	rechn. (STAN) rechn. (STAN)	1 1'116 89 50	0.001 0.0 0.018 0.04	0.0 32.3 30.0 [56]		
IN	Triage Biogas	FAU-TBGA BGA-TBGA	Biogas Biogas	77 28	[25] [25]	455 162	5.90 5.90	[5] [5]		0 0			4 1	0.1 0.0	[56] [56]		
				105		617				0			5				
OUT	Triage Biogas	VGÄ2-VBR VGÄ-VTR	Biogas Biogas	103 2	0.982 [25] 0.018 [25]	606 11	5.90 5.90	[5] [5]		0 0			5 0	0.982 0.018	0.0 0.0	[54] [54]	
				105		617				0			5				
IN	Sammlung Verluste	FAU-SVGP BGA-SVGP	Verluste Verluste	4 4	rechn. (STAN) rechn. (STAN)	24 0		rechn. (STAN) rechn. (STAN)		0 0			222 50		[56] [56]		
				8		24				0			273				
OUT	Sammlung Verluste	VGÄ-OUT2	Verluste Gärprozess	8	1.000 rechn. (STAN)	24		rechn. (STAN)		0			273		rechn. (STAN)		
Verarbeitung Treibstoffe																	
IN	Biogasaufbereitung	VGÄ-VTR	Biogas	2	[25]	11	5.90	[5]		0			0.1	0.0	[54]		
OUT	Biogasaufbereitung	BAB-STRS VTR-OUT1	aufbereitetes Biogas Verluste	1 1	0.600 [56] 0.400 [56]	11 0	0.970 0.030	[6] [6]		0 0			0.0 0.0	0.5 0.5	[56] [56]		
				2		11				0			0.1				
IN	Ölpresse	PFL-VTR	Energiepflanzen	1	[29]	7	6.45	rechn. aus [5]		7	7.2	[15]	38	36.8	[11]		
OUT	Ölpresse	ÖLP-BDH VTR-THA	Pflanzenöl Presskuchen	1 0	0.530 [5] 0.470 [5]	6 1	10.33 2.07	[5] rechn. (STAN)		0 7	0.0 15.3	[7] rechn. (STAN)	0 38	0.0 78.3	[7] [30], [7]		
				1		7				7			38				
IN	Biodieselerstellung	ÖLP-BDH INP-VTR	Pflanzenöl Methanol	1 1	[5] [56]	6 1	10.33 6.99	[5] rechn. (STAN)		0 0	0.0 0.0		0 0	0.0 0.0	[7]		
				1		6				0			0				
OUT	Biodieselerstellung	VTR-VGÄ BDH-STRS	Glycerin Biodiesel	0 1 1	0.100 [56] 0.900 [56]	0 6 6	4.72 10.33	[5] [5]		0 0	0.1 0.0	[30]	0 0	0.1 0.0	[30]		
IN	Sammlung Treibstoffe	BAB-STRS BDH-STRS	aufbereitetes Biogas Biodiesel	1 1	[56] [56]	11 6	9.54 10.33	[6] [5]		0 0	0.0 0.0		0 0	0.0 0.0	[56] 0.00		
				2		17				0			0				
OUT	Sammlung Treibstoffe	VTR-OUT2	Treibstoffe	2	1.000 rechn. (STAN)	17	9.81	rechn. (STAN)		0	0.0		0	0.0	rechn. (STAN)		

1kg_ms de déchets biogènes = 4.72 KWh

1kg_ms de boues sèches = 4.72 KWh

1. un habitant suisse moyen produit :

73 kg_ms de déchets biogènes par année

33 kg_ms d'eau sales

2. après collecte et épuration des eaux :

$73 * 0.8 = 58.4$ kg_ms

$33 * 0.65 = 21.5$ kg_ms

3. matière sèche méthanisable :

$58.4 + 21.5 = 80$ kg_ms

4. potentiel thermique :

$80 * 4.72 = 377.6$ KWh

5. 1ère conversion en biogaz :

$377.6 * 0.5 = 190$ KWh

6. 2ème conversion par co-génération :

rendement électrique (20-40%)

rendement thermique (40-60%)

$190 * 0.2 = 38$ KWh

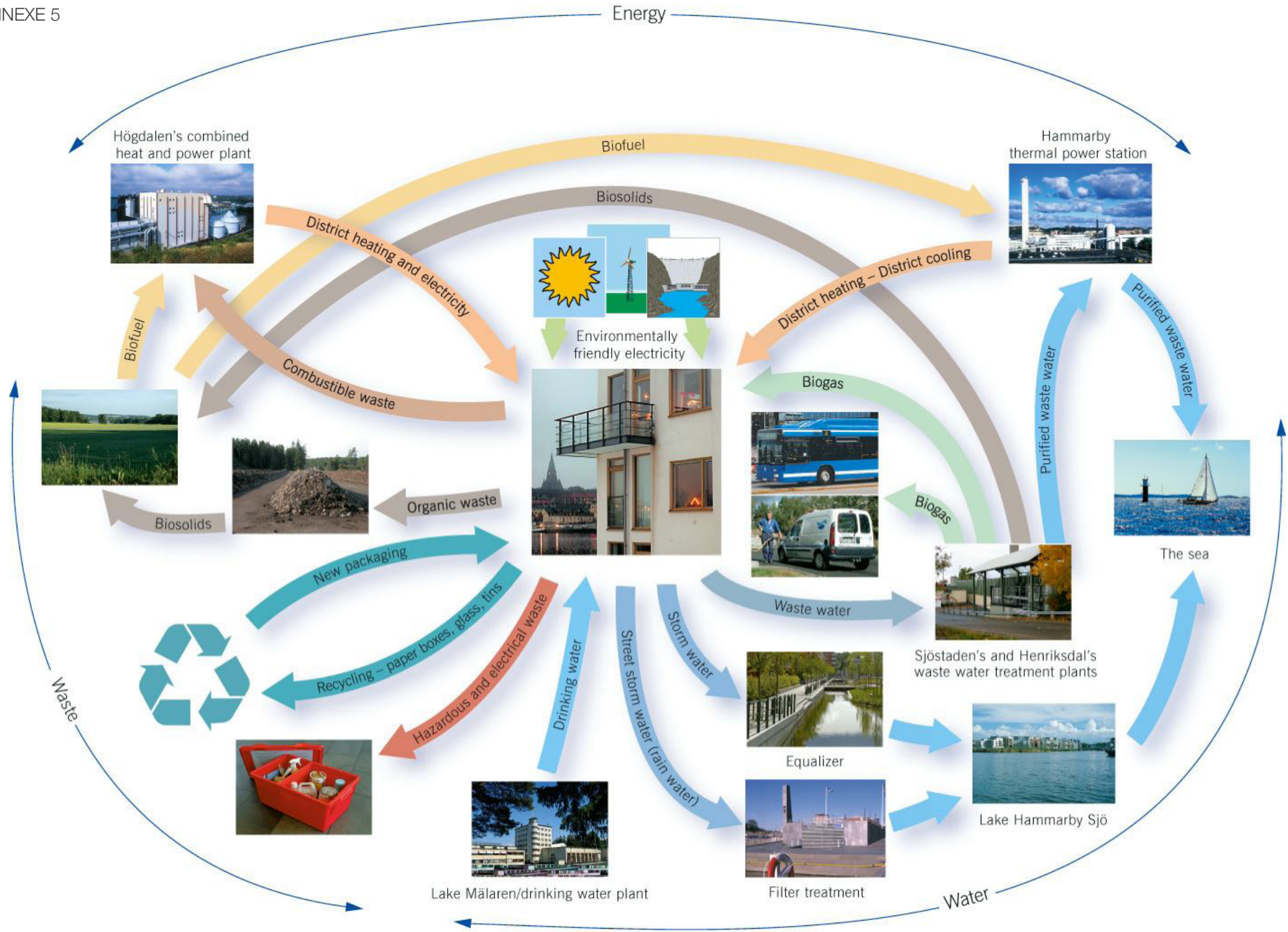
$190 * 0.4 = 76$ KWh

$190 * 0.6 = 114$ KWh

production électrique = 38 - 76 KWh/année

production en énergie thermique = 76 - 114 KWh/année

Kultur	Frisch- masse Feld- abfuhr [dt/ha]	N im Ernte- gut [kg/ha]	Frisch- masse Ern- terückstand [dt/ha]	N im Ernte- rückstand [kg/ha]	Anrechen- bare N- Freisetzung [kg N/ha]
Schwachzehrende Gemüsekulturen					
Rettich	550	100	250	60	30
Radies	300	60	50	10	10
Möhren	700	100	200	60	30
Rote Rüben	600	170	400	100	50
Zwiebeln	600	110	150	60	30
Schnittlauch	300	150	100	50	25
Petersilie	240	110	60	25	12
Grünkohl	200	120	250	90	44
Erbsen	60	60	320	130	64
Chicorée	450	113	300	75	38
Salate	500	90	100	18	9
Feldsalat	80	36	20	20	4,5
Spinat	200	80	50	20	10
Mittelstarkzehrende Gemüsekulturen					
Kohlrabi	450	130	150	53	26
Sellerie (Knolle)	500	125	250	75	38
Porree	500	125	340	102	51
Chinakohl	700	105	500	90	45
Rosenkohl	250	165	650	260	130
Buschbohnen	120	30	220	88	44
Gurken (Einlege-)	700	105	500	100	50
Starkzehrende Gemüsekulturen					
Weißkohl – Frischmarkt *)	600	120	500	150	60
Weißkohl – Industrie *)	1000	200	500	150	75
Blumenkohl	350	100	450	155	77
Brokkoli	150	68	550	193	96
Wirsing	350	123	350	140	70
Zucchini *)	650	100	550	165	83
Stangenbohnen	250	65	450	144	72
Zuckermais	200	50	400	120	60
Quelle: Düngung im Freilandgemüsebau, Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau, Großbeeren/Erfurt e.V., Heft 4, 2. Auflage, Mai 2007, Potsdam					



ANNEXE 6



