



## I. Introduction (20mn)

- Le programme de recherche
- Les objectifs 2050

Questions / Réponses (10mn)

## II. Premiers résultats (20mn)

Questions / Réponses (10mn)



# Introduction

# Introduction – Le programme de recherche

Trois objectifs composent le programme de recherche et correspondent à trois phases successives.

**Définir le concept scientifique** qui préfigure le niveau de performance et les techniques envisageables pour produire un bâtiment répondant aux enjeux du futur, à horizon 2050.

Les fonctionnalités principales du bâtiment seront :

- héberger les activités de recherche d'un groupe de 80/100 chercheurs
- proposer 1000m<sup>2</sup> de logements expérimentaux

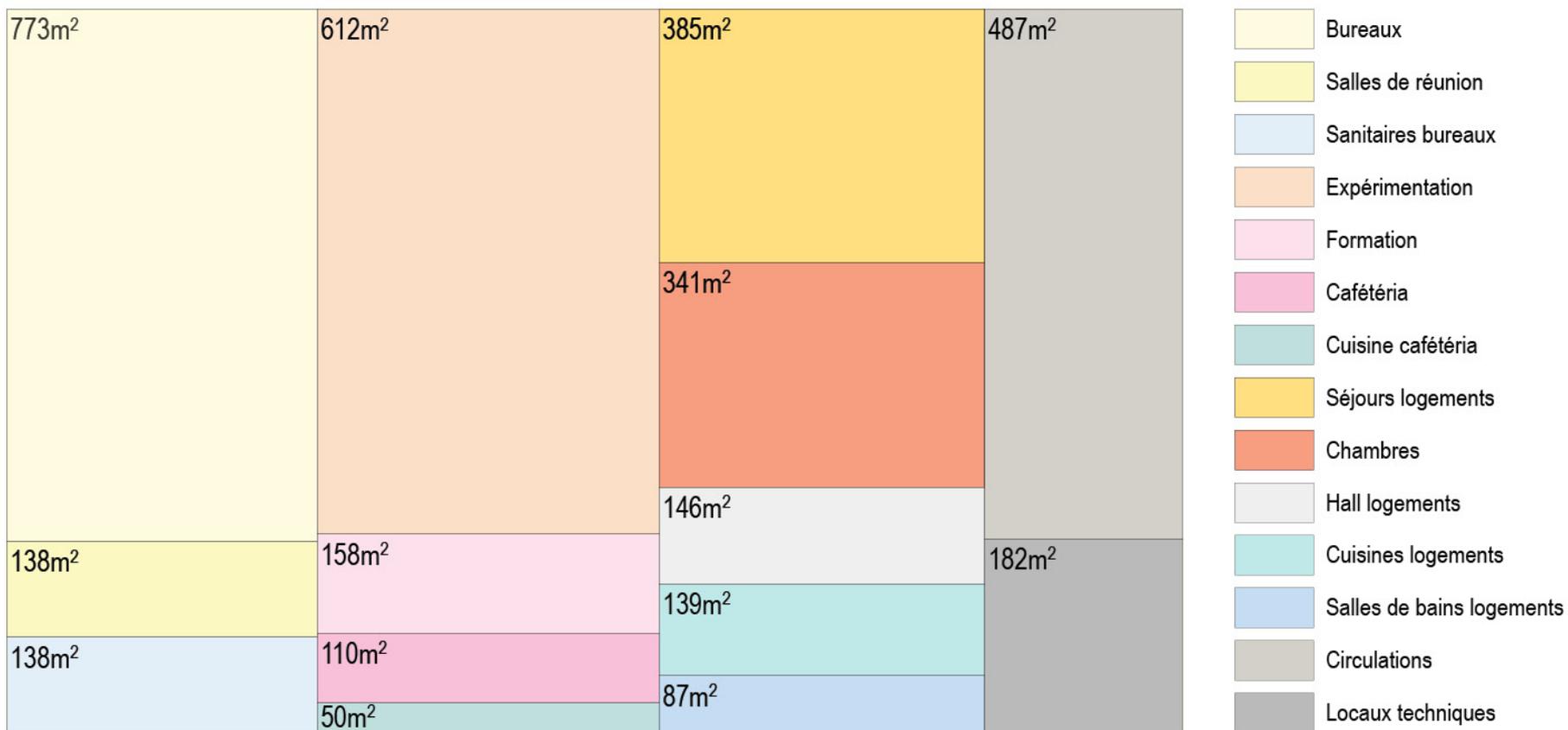
Pour une surface de 4000 m<sup>2</sup> avec une extension possible de 50%

**Transcrire ces exigences** dans un programme opérationnel sous 3 formes :

- Par des obligations de moyens,
- Par des obligations de résultats,
- Par des recommandations.

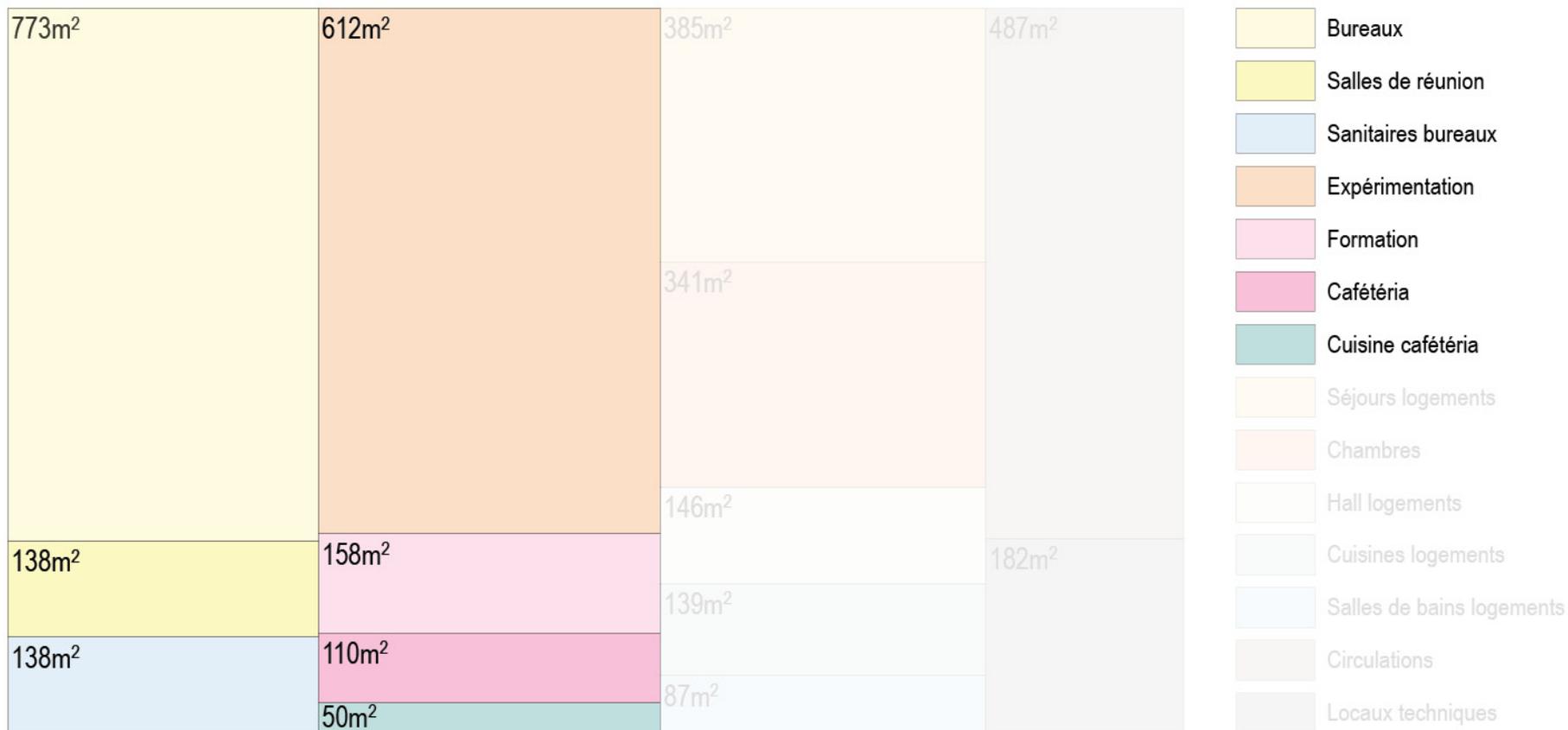
**Valoriser le programme de recherche** à travers diverses communications, scientifiques et professionnelles.

# Introduction – le smart living lab



# Introduction – le smart living lab

## Bureaux + expérimentations 1'980m<sup>2</sup>



# Introduction – le smart living lab

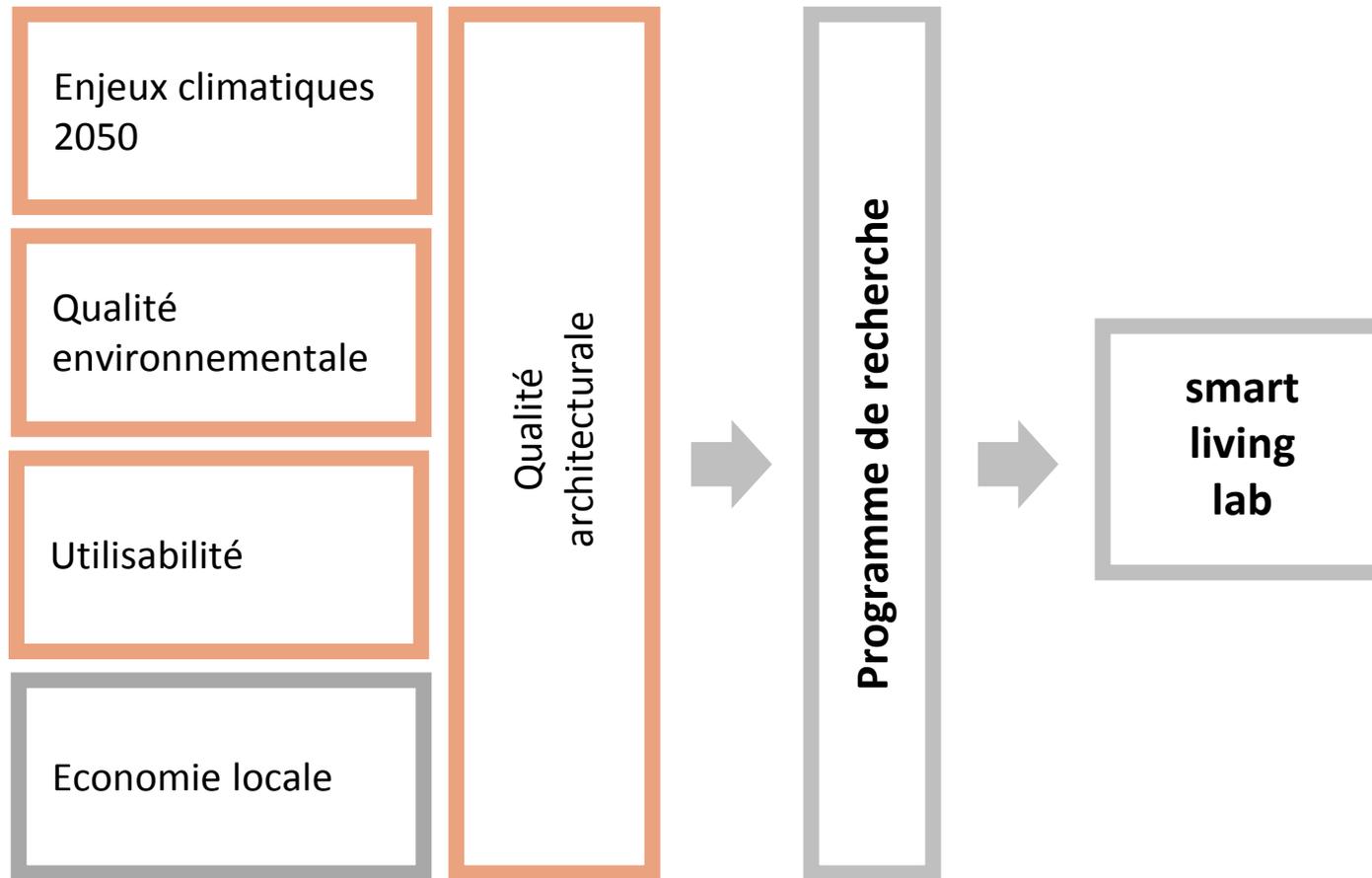


# Introduction – le smart living lab

Circulation  
+ techniques 669m<sup>2</sup>



# Introduction – Le programme de recherche



# Introduction – Les acteurs

## EPFL Fribourg : Smart building research group

Thomas Jusselme  
Dr. Didier Vuarnoz  
Dr. Arianna Brambilla  
Dr. Endrit Hoxha  
Dr. Michelle Jiang  
Stefano Cozza  
Amélie Poncétý

## LIPID / Interdisciplinary Laboratory of Performance-Integrated Design

Prof. Marilyne Andersen

## LAST / Laboratory of Architecture and Sustainable Technologies

Prof. Emmanuel Rey

## HUMAN-IST / Human Centered Interaction Science and Technology

Prof. Denis Lalanne  
Dr. Julien Nembrini

## EPFL+ECAL LAB /

Nicolas Henchoz  
Jasmine Florentine  
Andreas Sonderegger  
Rudi Nieveen  
David Roullin  
Andreas Koller

## LASUR / Urban Sociology Laboratory

Prof. Vincent Kaufman  
Dr. Luca Pattaroni  
Thierry Maeder  
Virginie Baranger  
Derek Christie

## GRIPS / Interaction and social practices research group

Prof. Esther Gonzalez-Martinez

## TRANSFORM / Heritage, Construction And Users

Prof. Florinel Radu  
Chantal Dräyer

## ENERGY

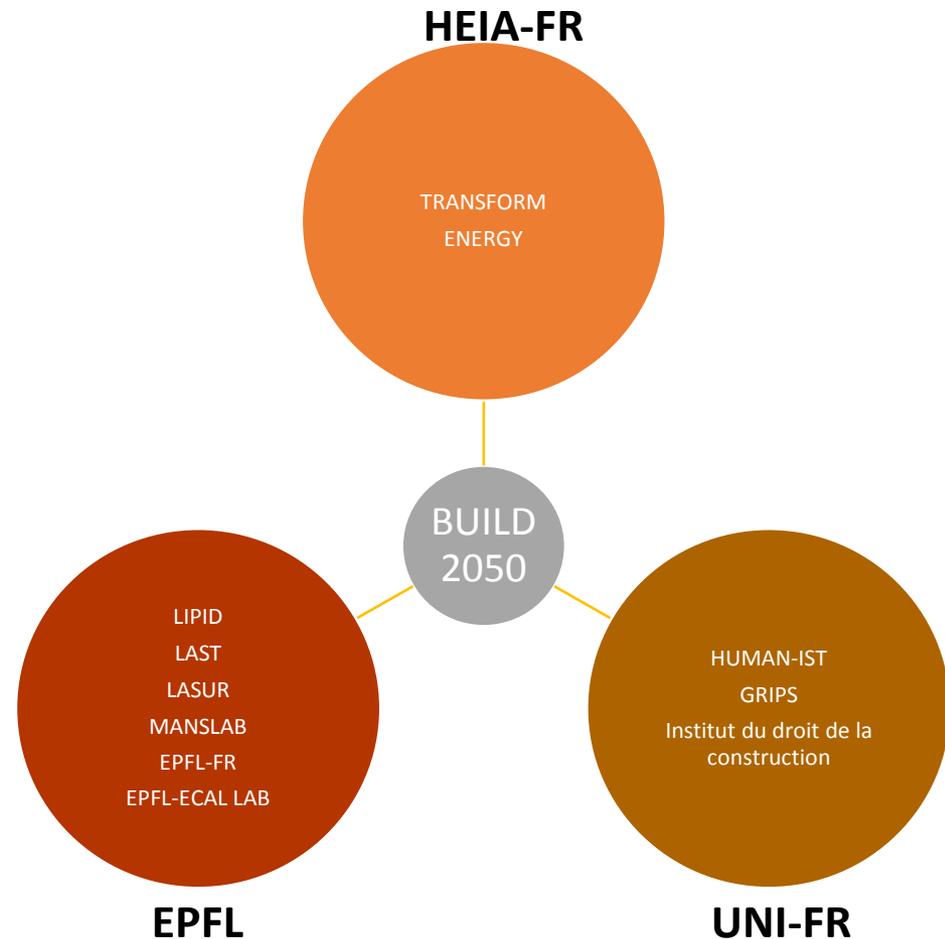
Dr Elena-Lavinia Niederhäuser  
Dr Jean-Philippe Bacher

## MANSLAB / Laboratoire de manufacture spatiale

Prof. Alexandre Blanc

## Institut du droit de la construction

Prof. Jean-Baptiste Zufferey  
Chantal Pantillon



# Introduction – Equation de Kaya

$$CO_2 = \frac{CO_2}{Cep} \times \frac{Cep}{PIB} \times \frac{PIB}{Pop} \times Pop$$

$\frac{CO_2}{Cep}$  : contenu en carbone de l'énergie mondialement utilisée,

$\frac{Cep}{PIB}$  : intensité énergétique mondiale du PIB,

$\frac{PIB}{Pop}$  : PIB per-capita.

# Introduction - Prospectives

Désignation	Source des données	Unité	2000	2010	2020	2035	2050
<b>Population</b>	OFS (2010)	Millions	7,2	7,9	8,4	8,9	9,0
<b>PIB</b>	SECO (2010)	Milliards CHF (réel, 2010)	464,2	546,6	617,9	700	800,7
<b>Structures des branches</b>	Chancellerie fédérale et OFS, 2011, adaptation de Prognos		-	-	-	-	-
<b>Surfaces de référence énergétique</b>	Wüest & Partner adaptation de Prognos	Millions m <sup>2</sup>	623,5	708,8	798,5	885,7	937,5
<b>Volumes de trafic voyageurs (PPA et PCF)</b>	ARE, 2012	Milliards personnes-km	100,1	114,2	131,1	146,0	151,3
<b>Volumes de trafic voyageurs (NPE)</b>	ARE, 2012	Milliards personnes-km	100,1	114,2	126,6	137,0	140,3
<b>Volumes de trafic marchandises (PPA et PCF)</b>	ARE, 2012	Milliards tonnes-km	23,6	26,9	34,2	40,3	42,3
<b>Volumes de trafic marchandises (NPE)</b>	ARE, 2012	Milliards tonnes-km	23,6	26,9	34,5	39,3	39,7
<b>Prix: exemple du pétrole (prix du marché mondial)</b>	AIE, WEO 2010, «New Policy», adaptation de Prognos	USD/baril (réel 2010)	34,3	76	99,9	114,1	116,9
	AIE, WEO 2010, «Scénario 450», adaptation de Prognos	USD/baril (réel 2010)	34,3	76	90,8	90,9	83,5

PPA: «Poursuite de la politique actuelle»

Source: Prognos 2012, OFS 2010, 2011, OFEN 2010, 2011, AIE 2010, ARE 2012

PCF: «Mesures politiques du Conseil fédéral»

NPE: «Nouvelle politique énergétique»

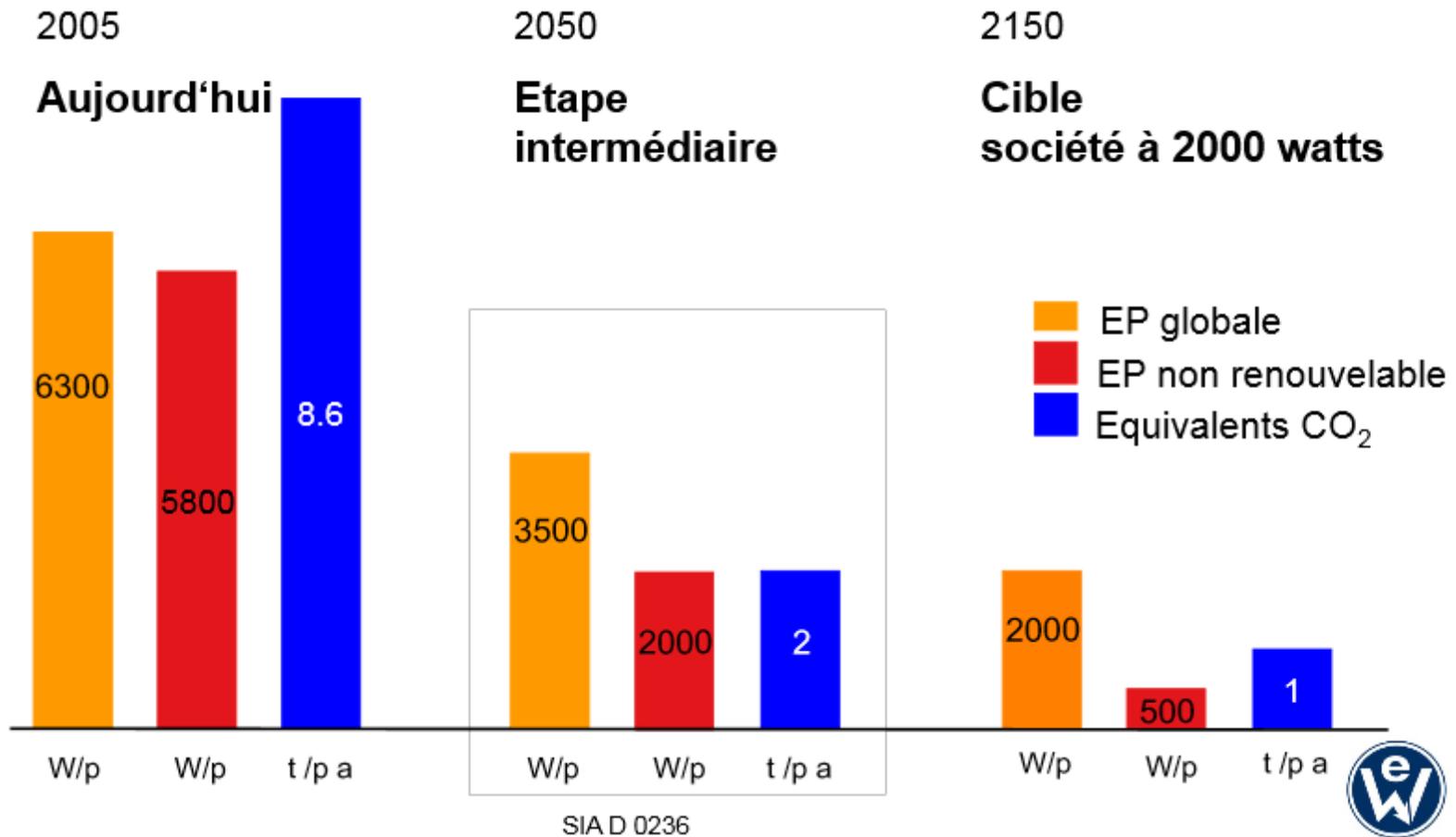
# Introduction – Indicateurs environnementaux

**GWP** : Global Warming Potential. Cet indice regroupe les émissions de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ...) contribuant à influencer l'équilibre de l'effet de serre de notre atmosphère. [ $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ ].

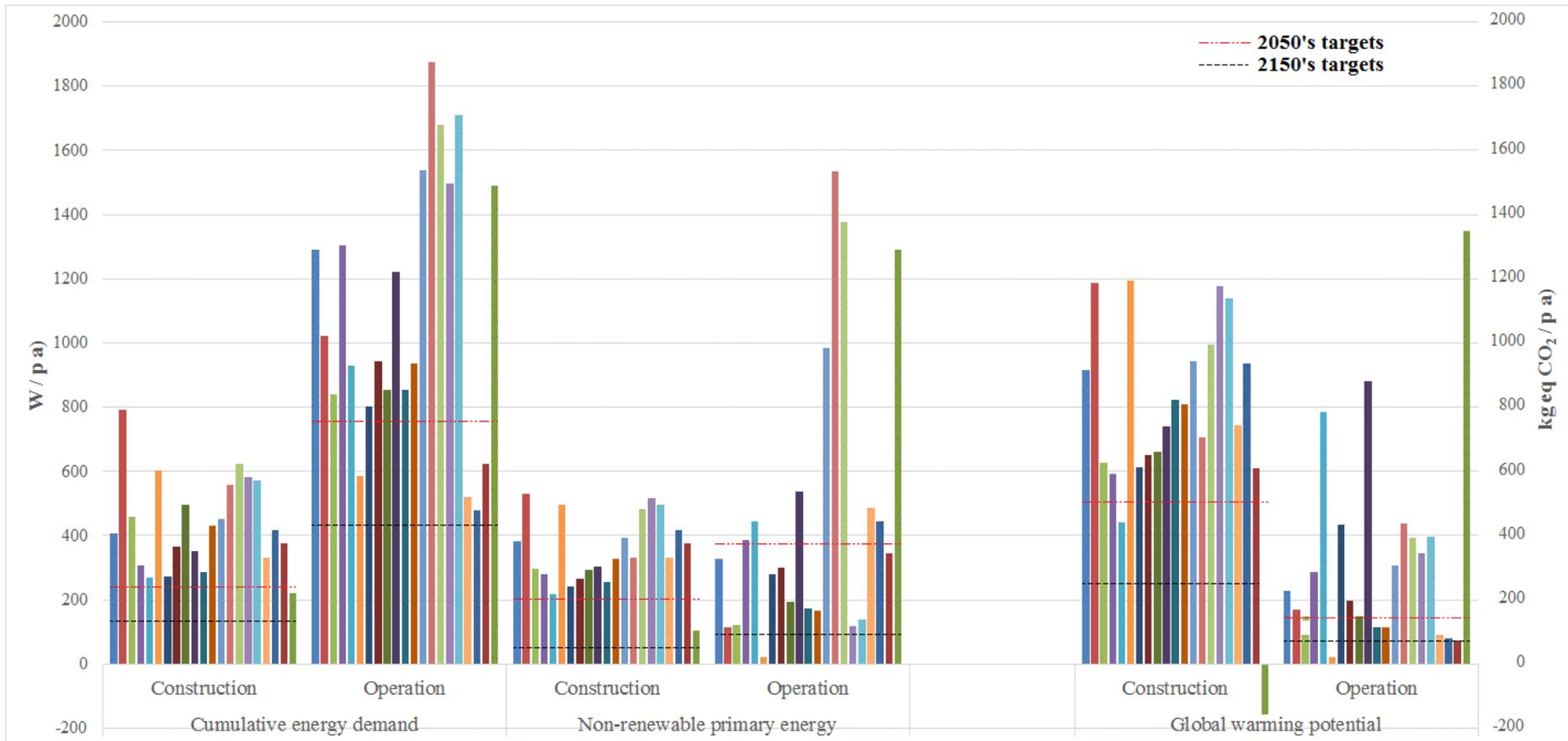
**CED** : Cumulative Energy Demand. Il s'agit de l'énergie totale nécessaire à la fabrication d'un bâtiment. Cet indicateur englobe l'énergie non renouvelable (fossile, nucléaire, forêt) ainsi que l'énergie renouvelable (hydraulique, solaire, biomasse, éolienne). [ $\text{MJ}$ ] / [ $\text{kWh}$ ].

**NRE** : Non Renewable Energy. Cet indicateur fournit une indication sur la part non renouvelable de l'énergie grise utilisée. [ $\text{MJ}$ ] / [ $\text{kWh}$ ].

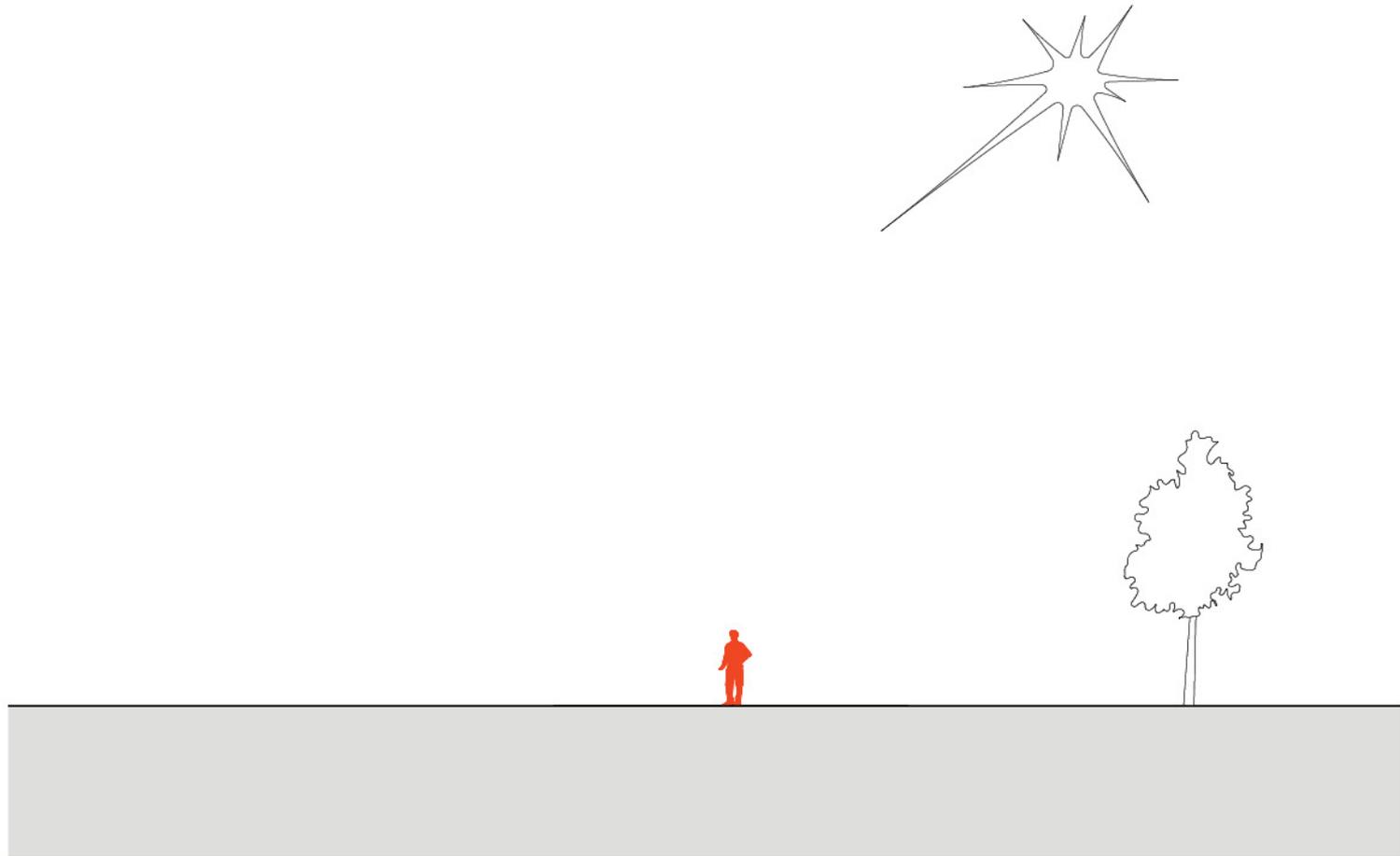
# Introduction – Objectifs de la société à 2000W



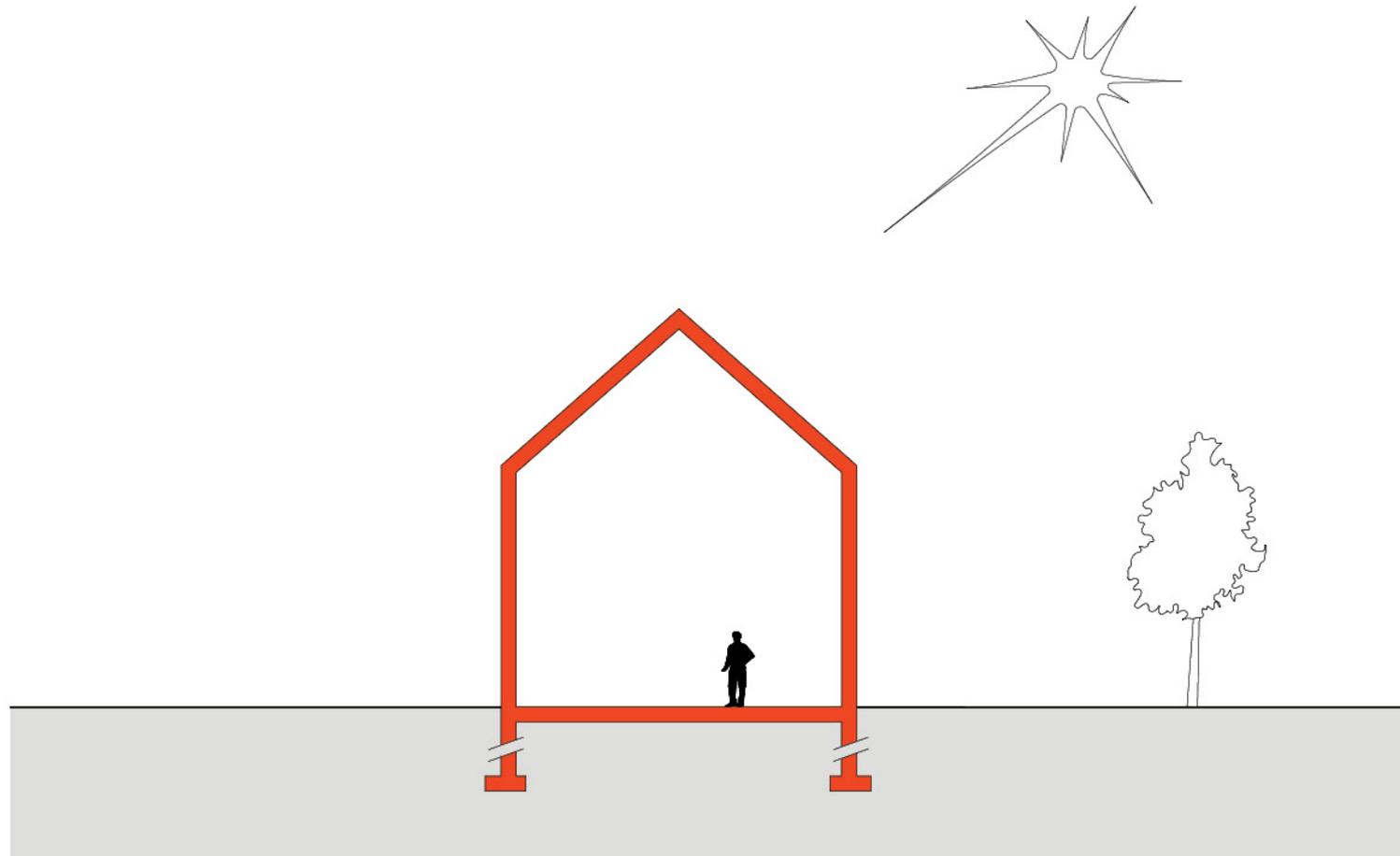
# Introduction – Etat de l'art



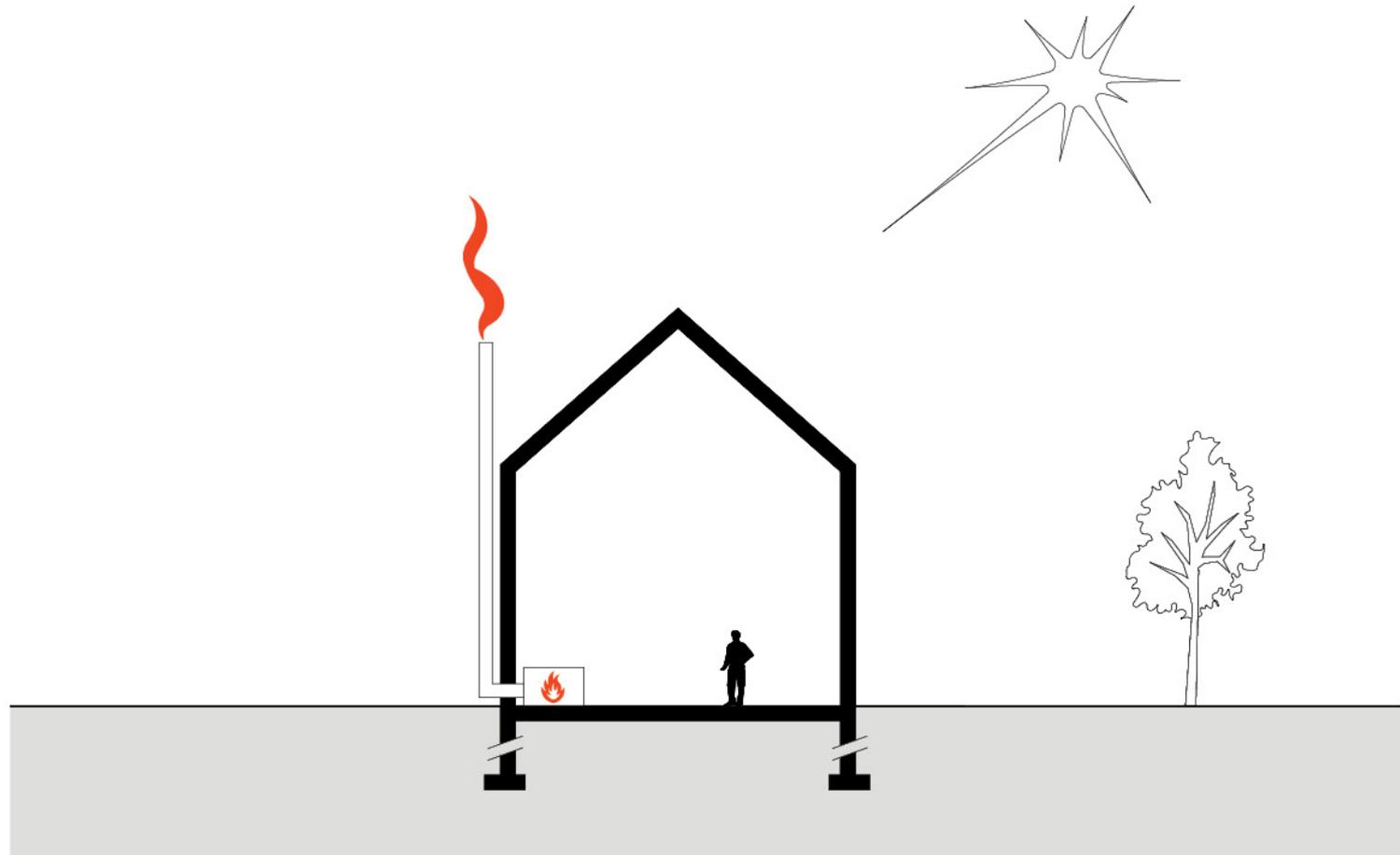
# Introduction – Pratique actuelle



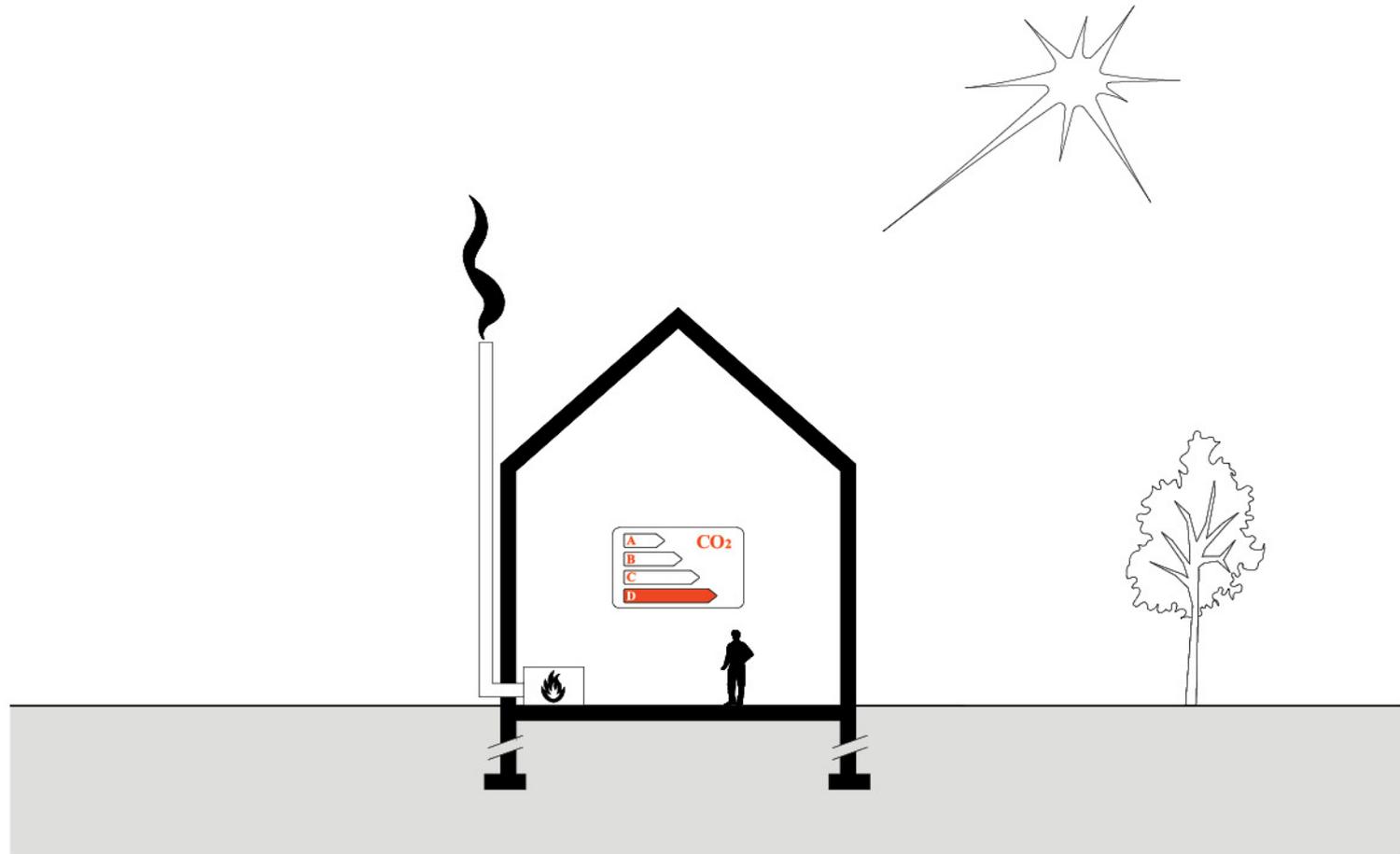
# Introduction – Pratiques actuelles



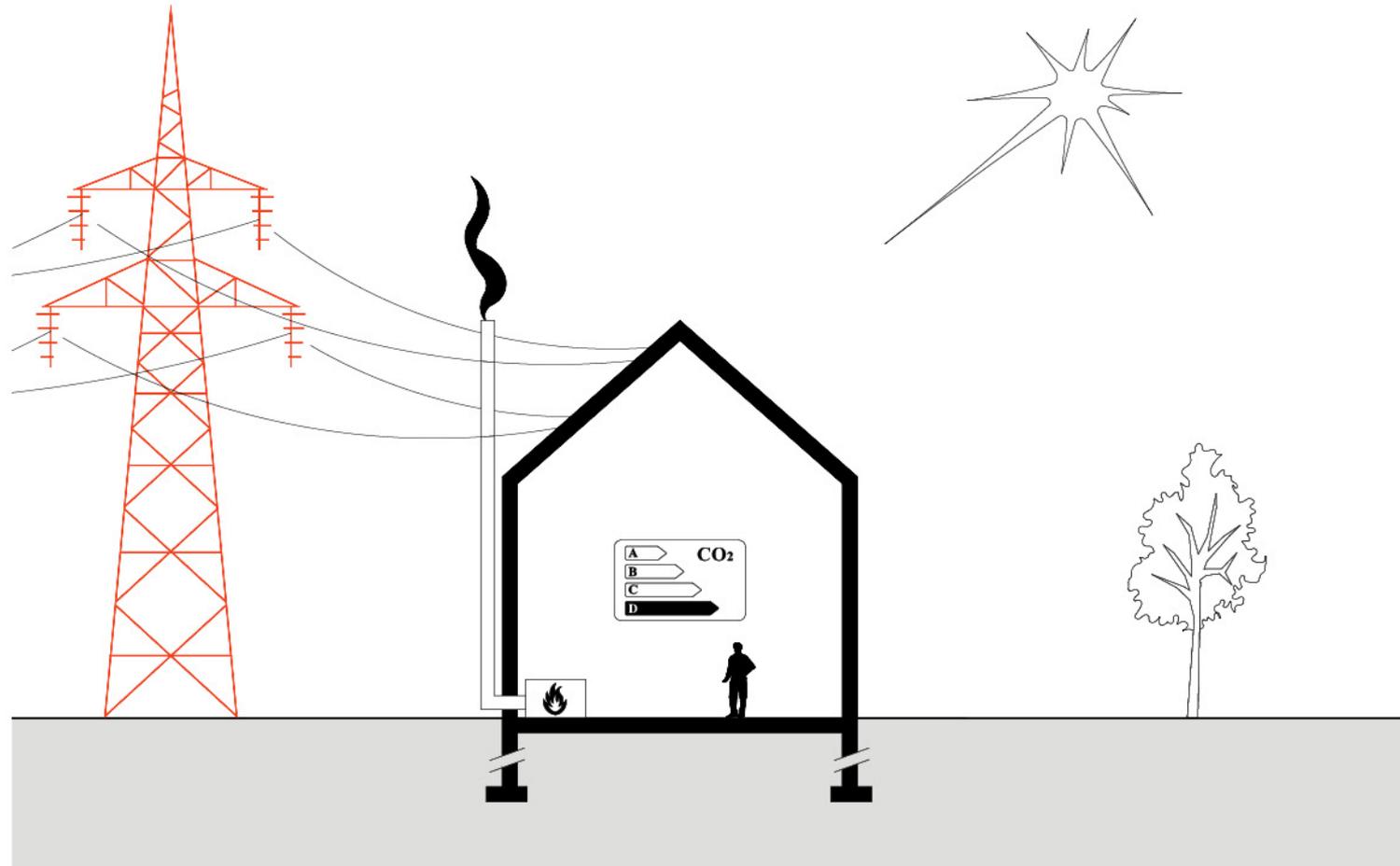
# Introduction – Pratiques actuelles



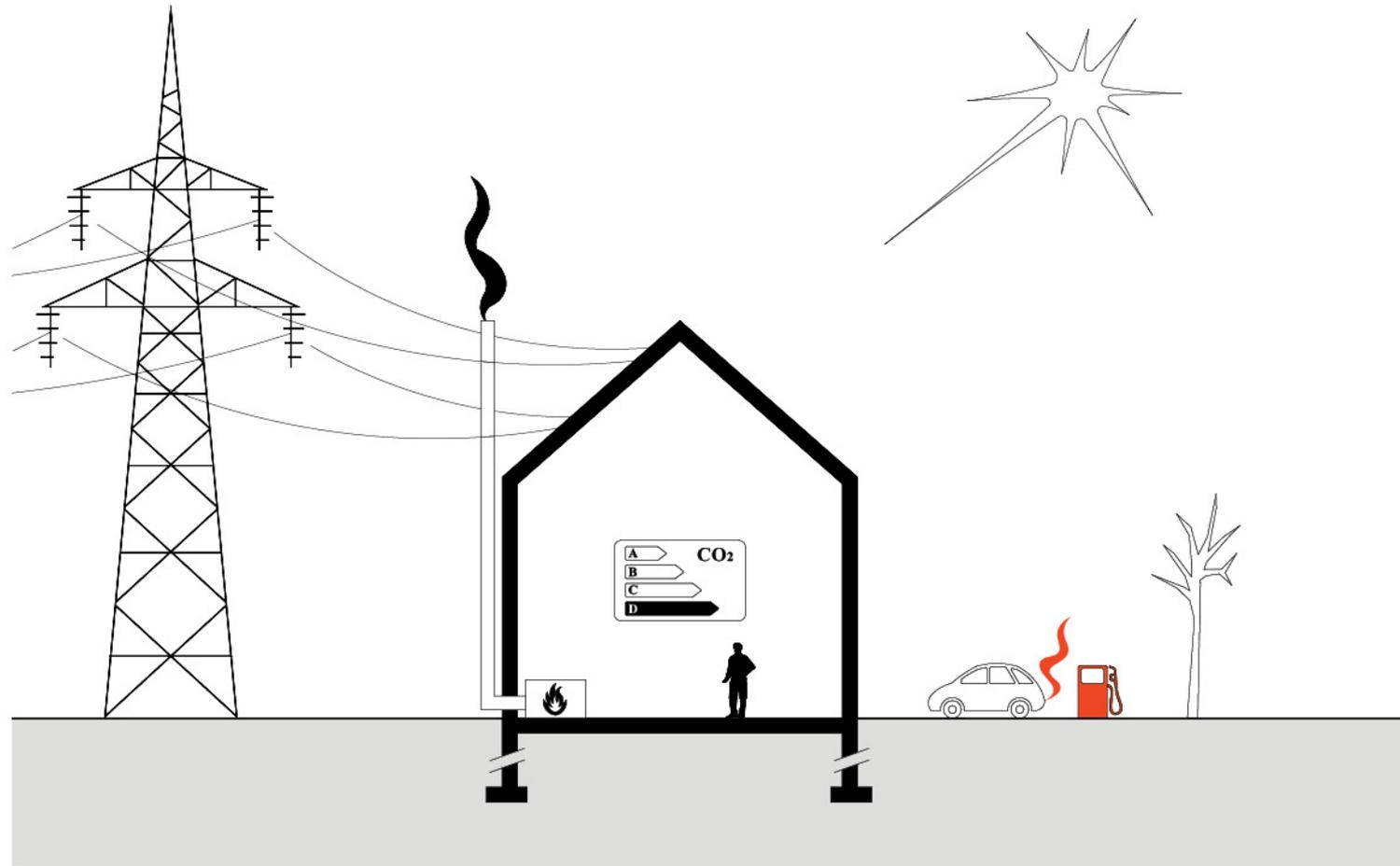
# Introduction – Pratiques actuelles



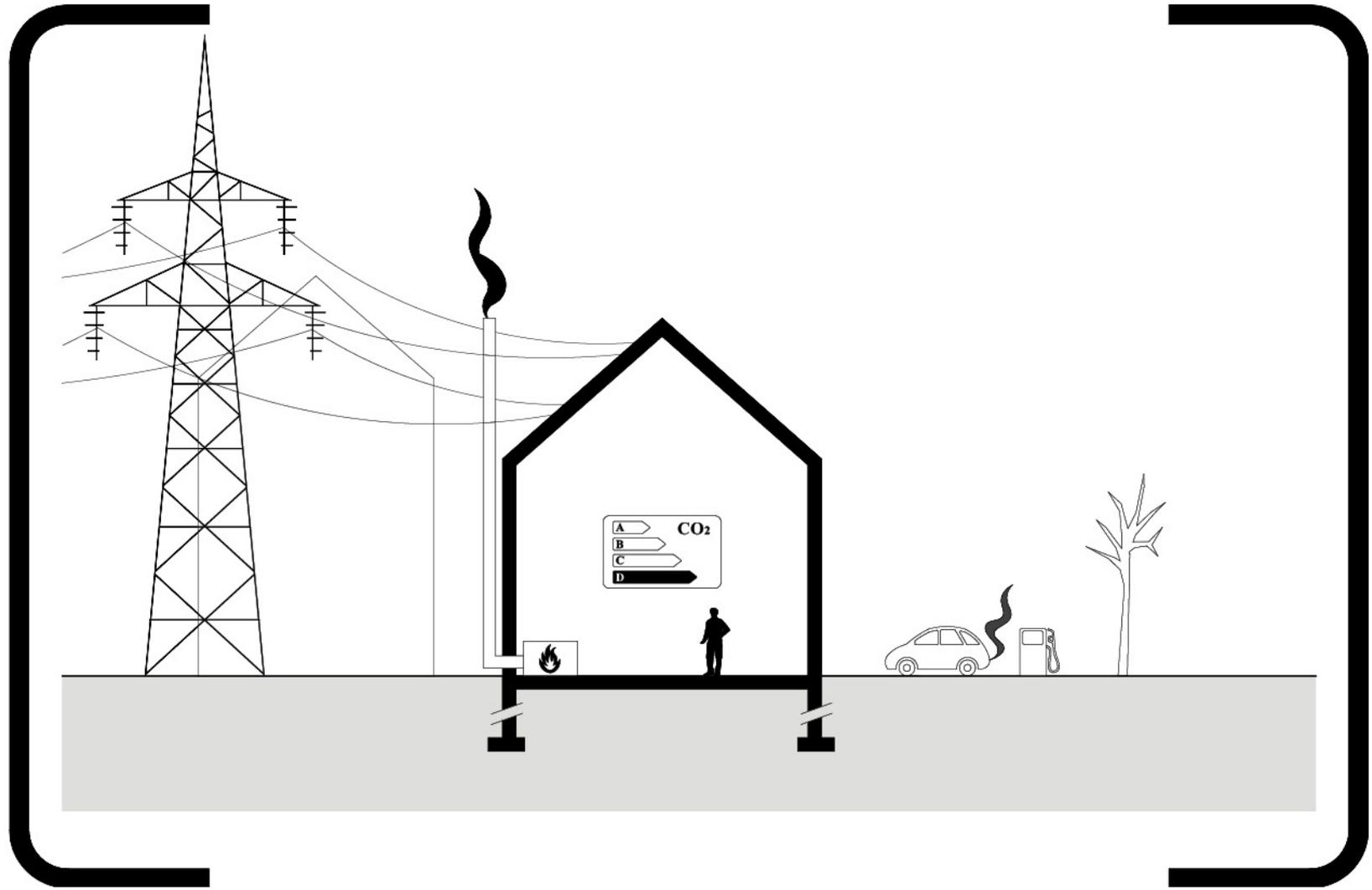
# Introduction – Pratiques actuelles



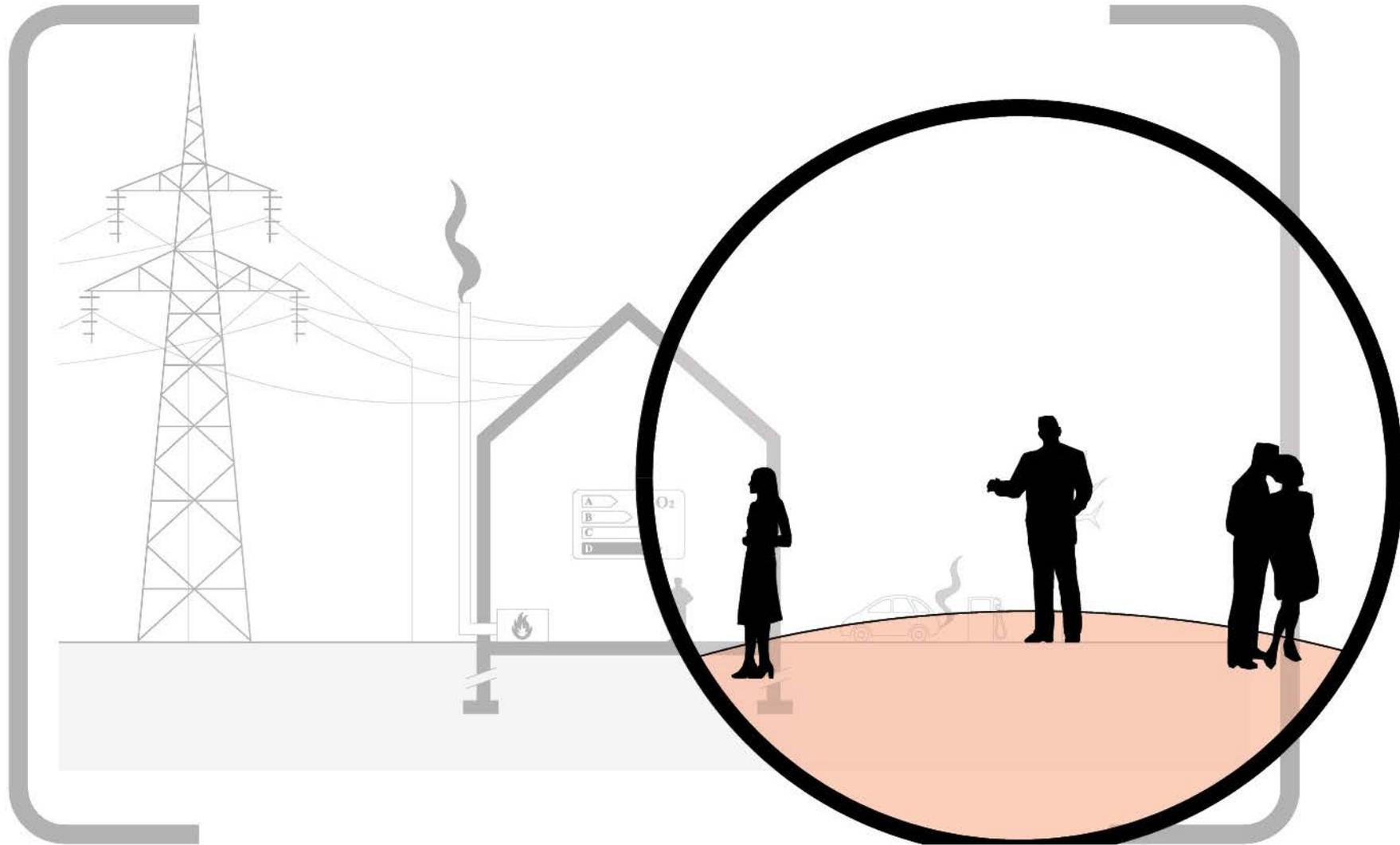
# Introduction – Pratiques actuelles



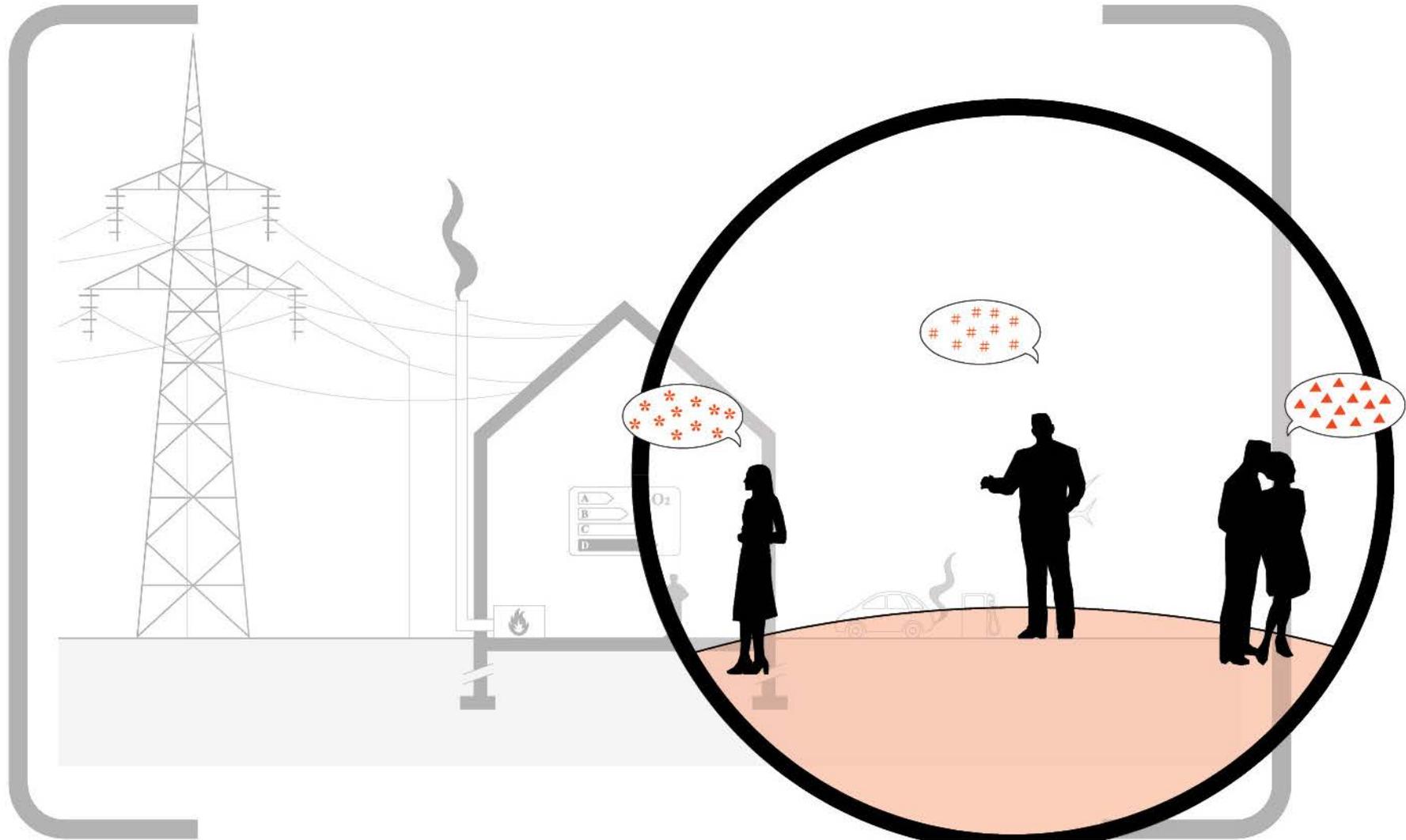
# Introduction – Pratiques actuelles



# Introduction – Pratiques actuelles



# Introduction – Pratiques actuelles



# Introduction - Objectifs

---

2015

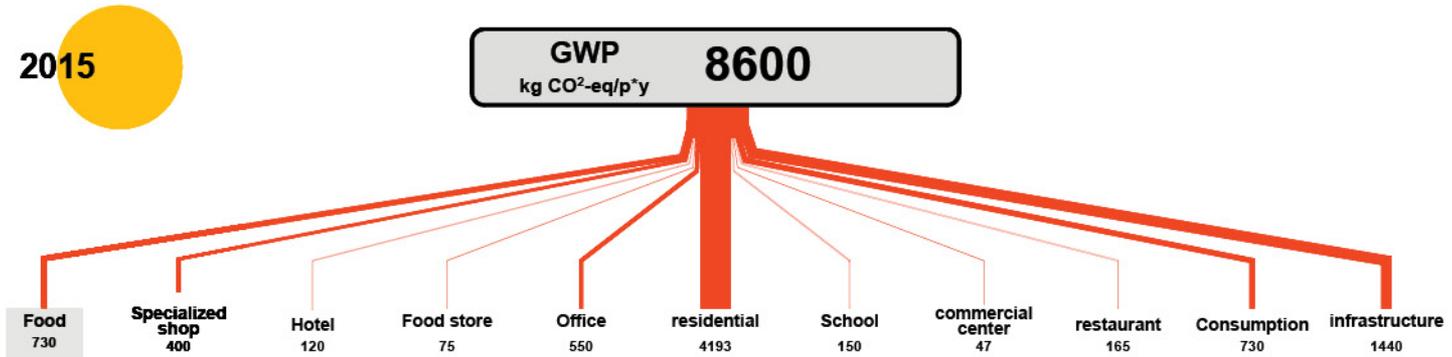


GWP  
kg CO<sub>2</sub>-eq/p\*y

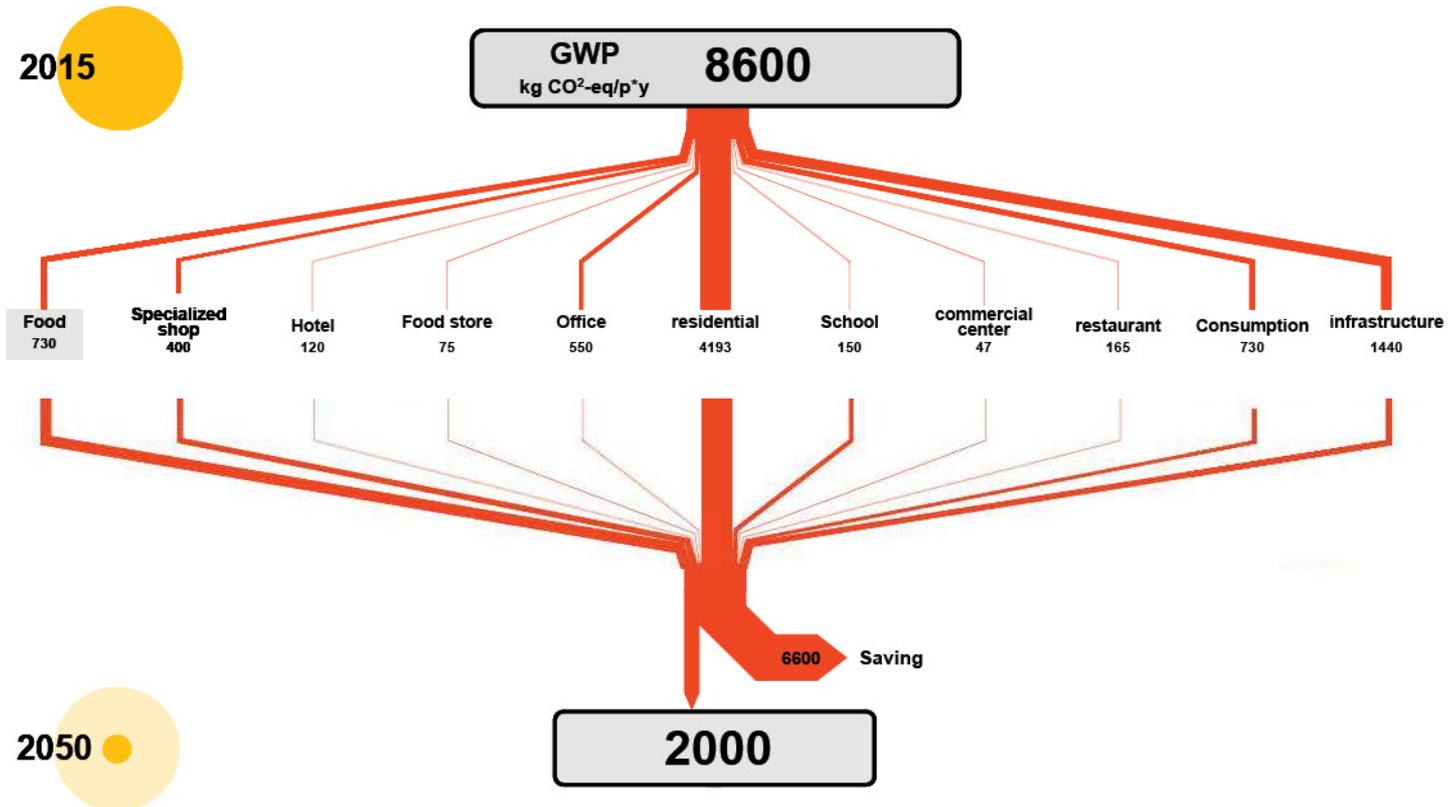
8600



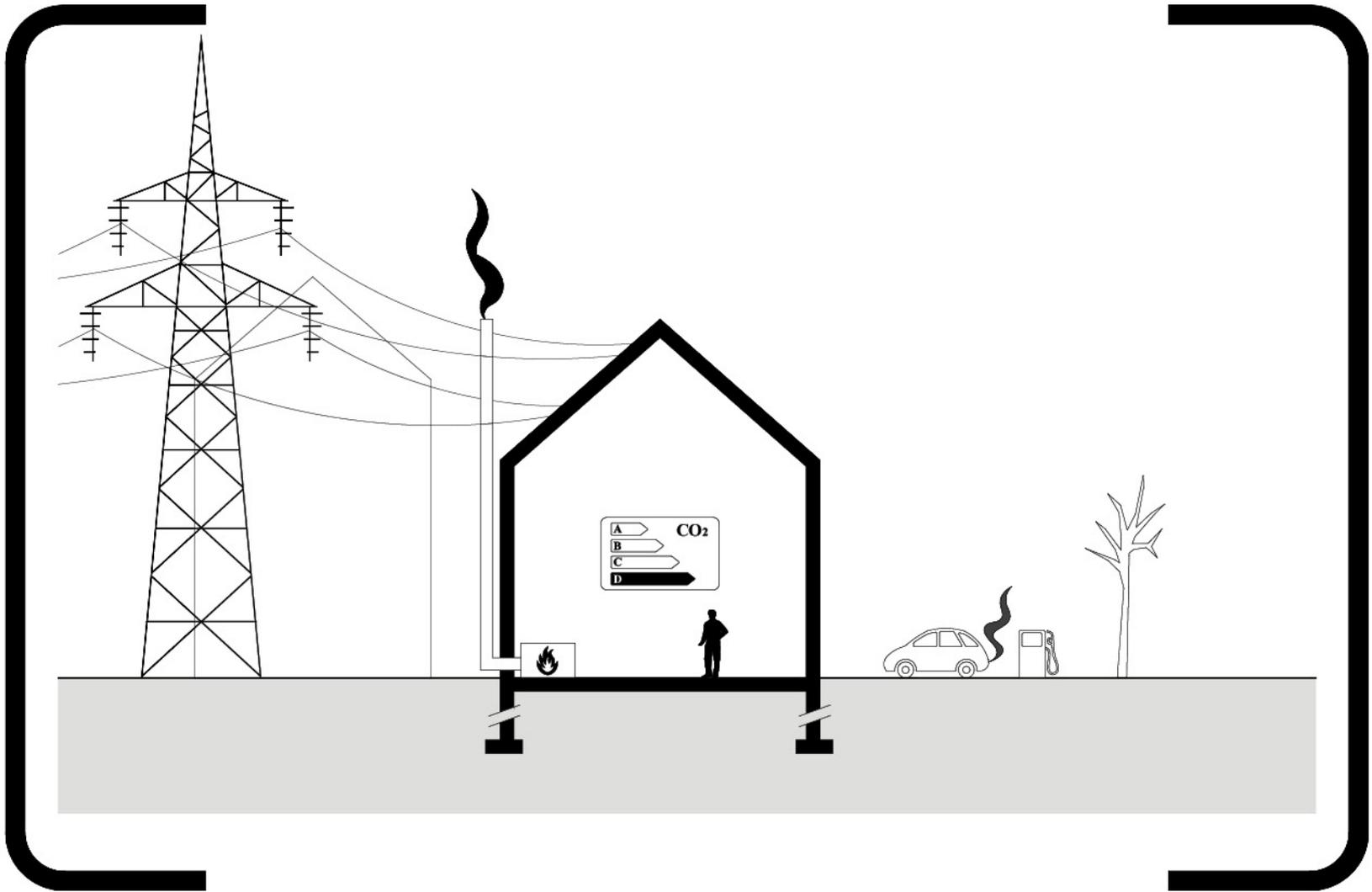
# Introduction - Objectifs



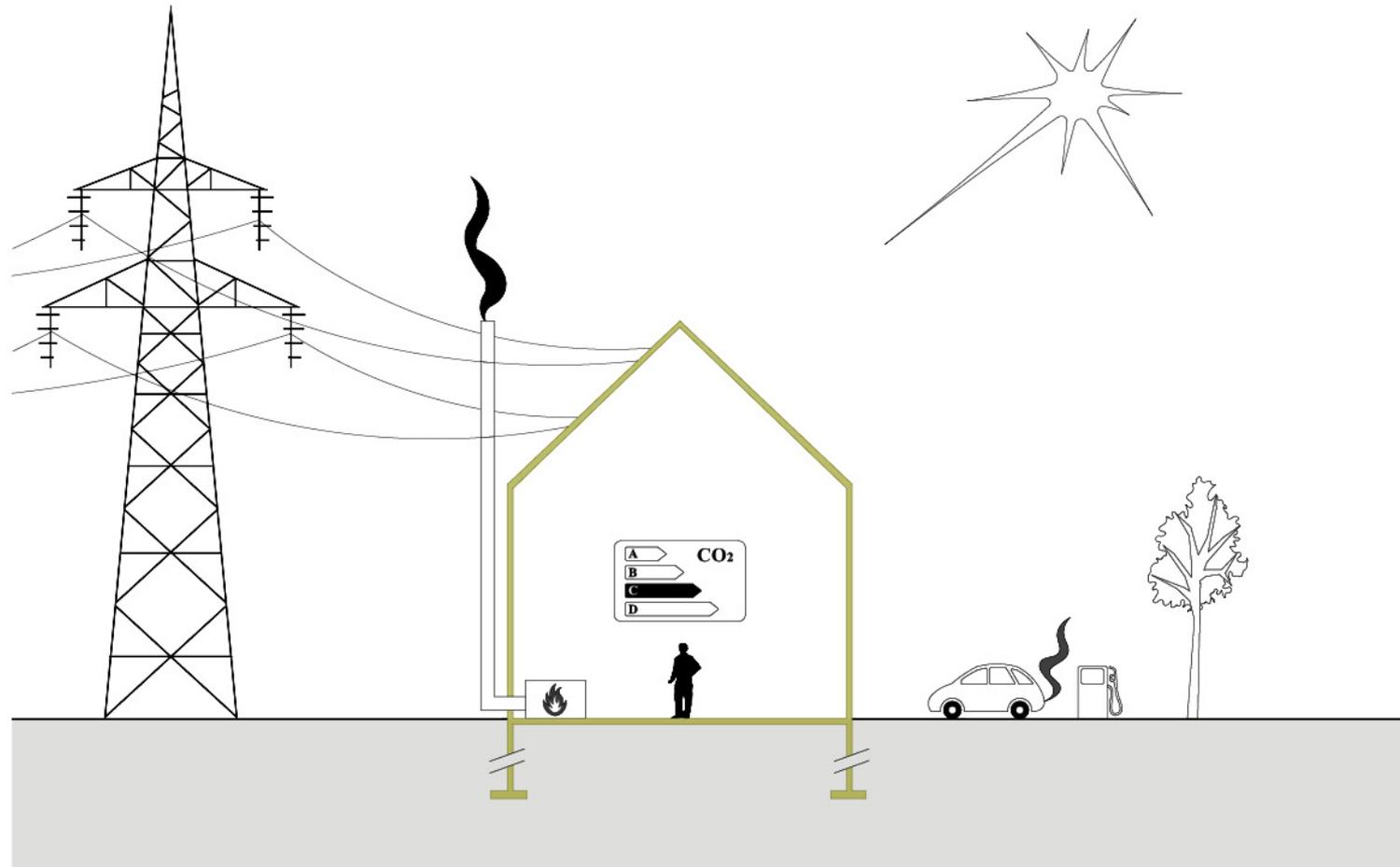
# Introduction - Objectifs



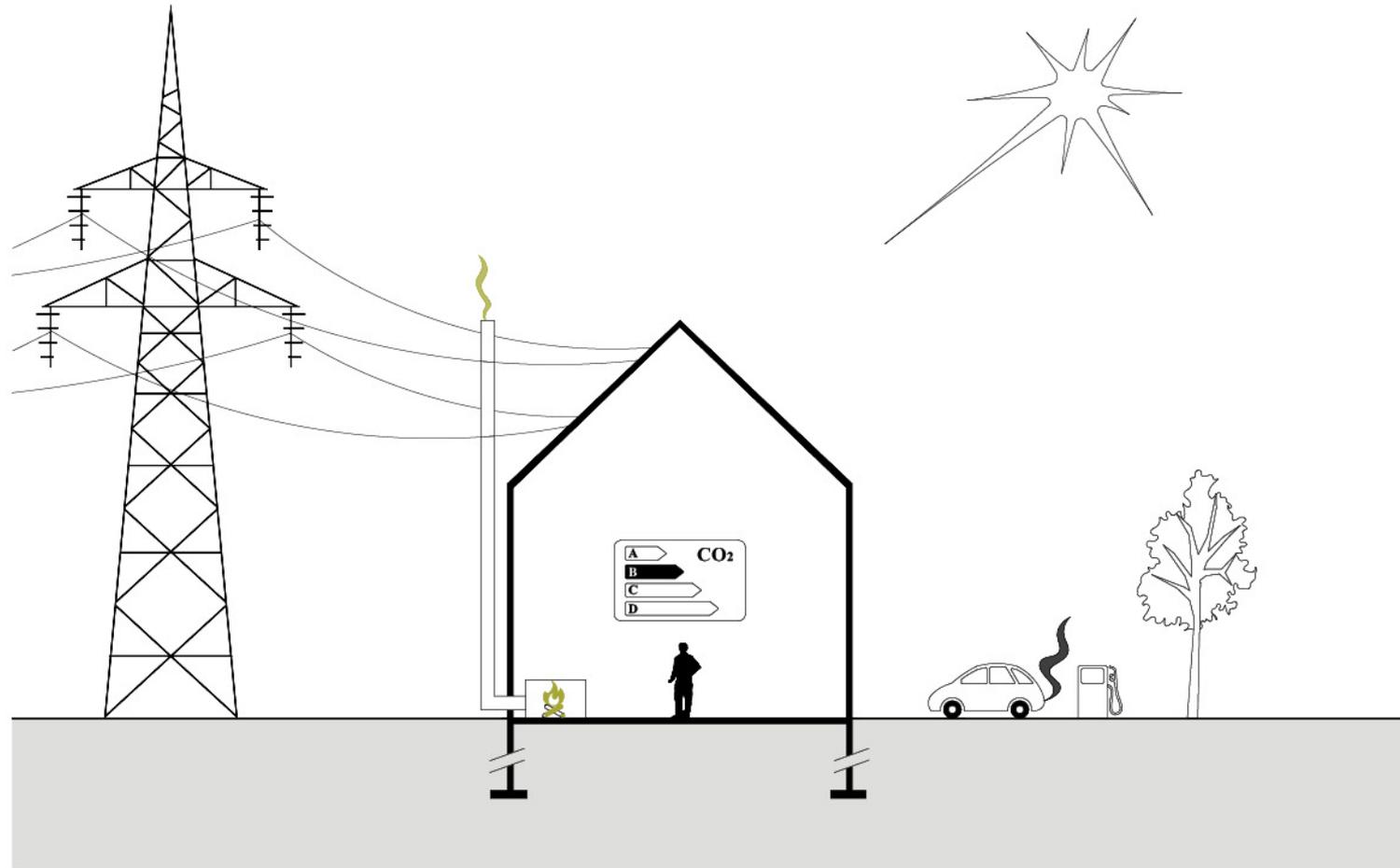
# Introduction - Stratégie



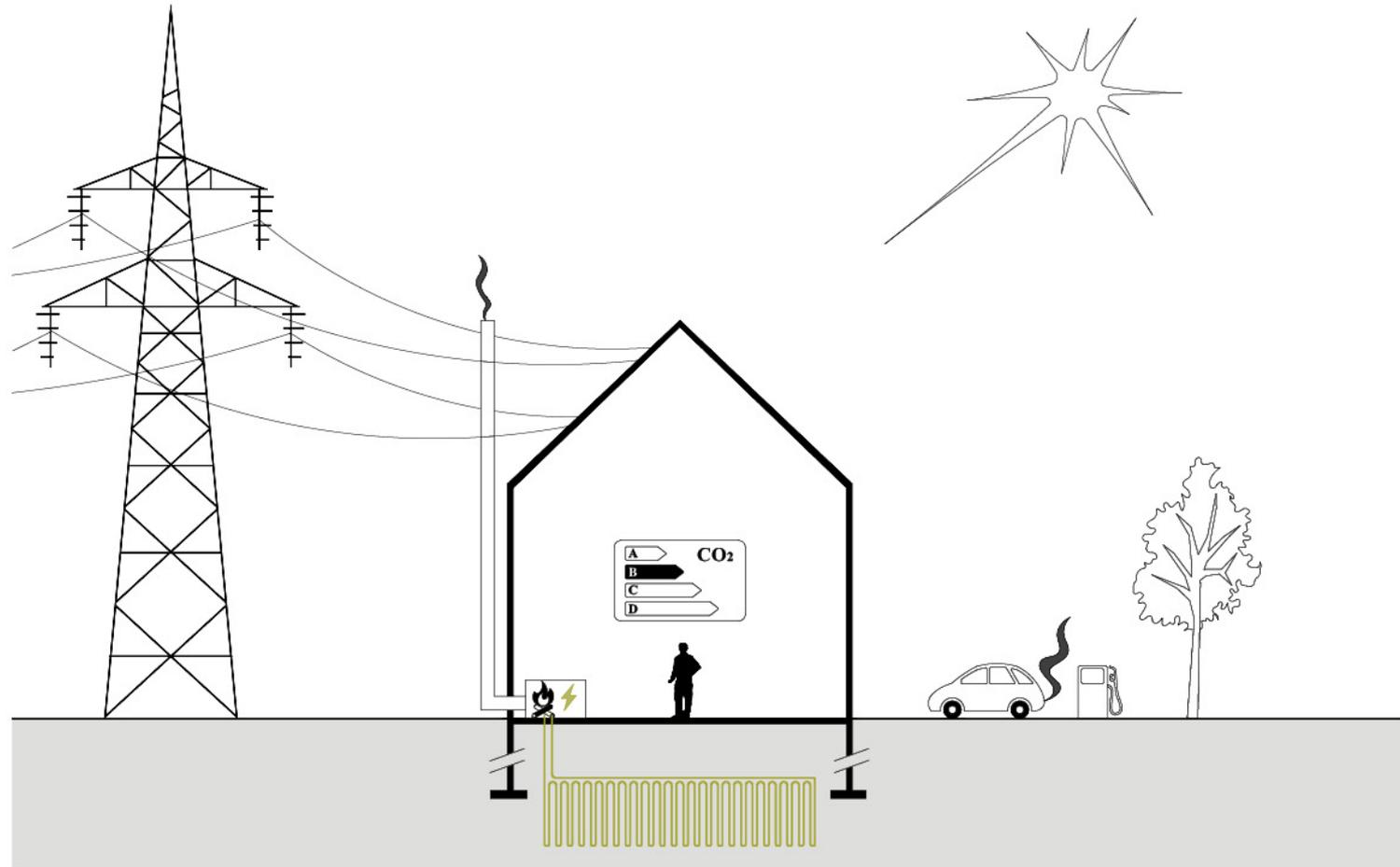
# Introduction – Stratégie 2050



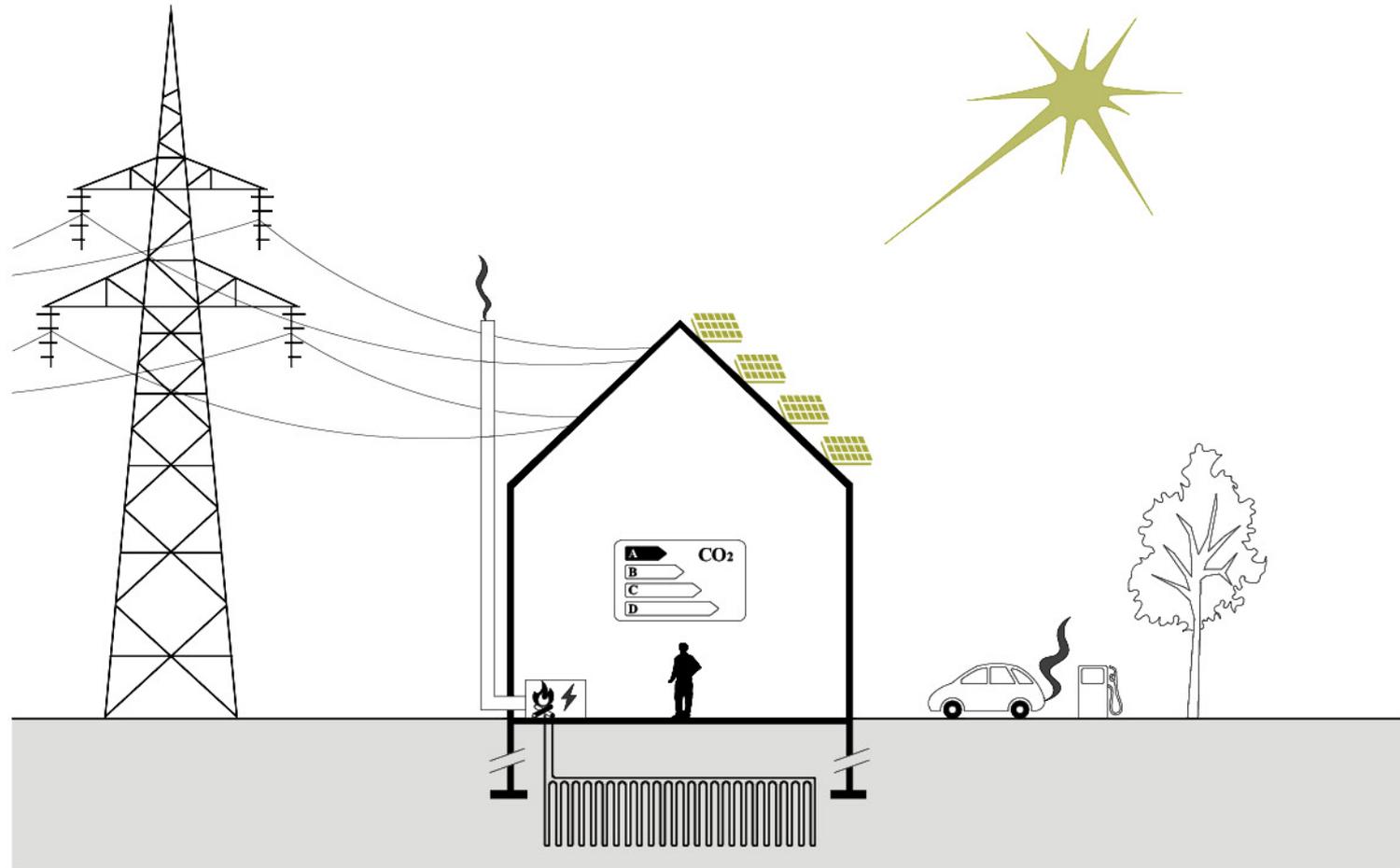
# Introduction – Stratégie 2050



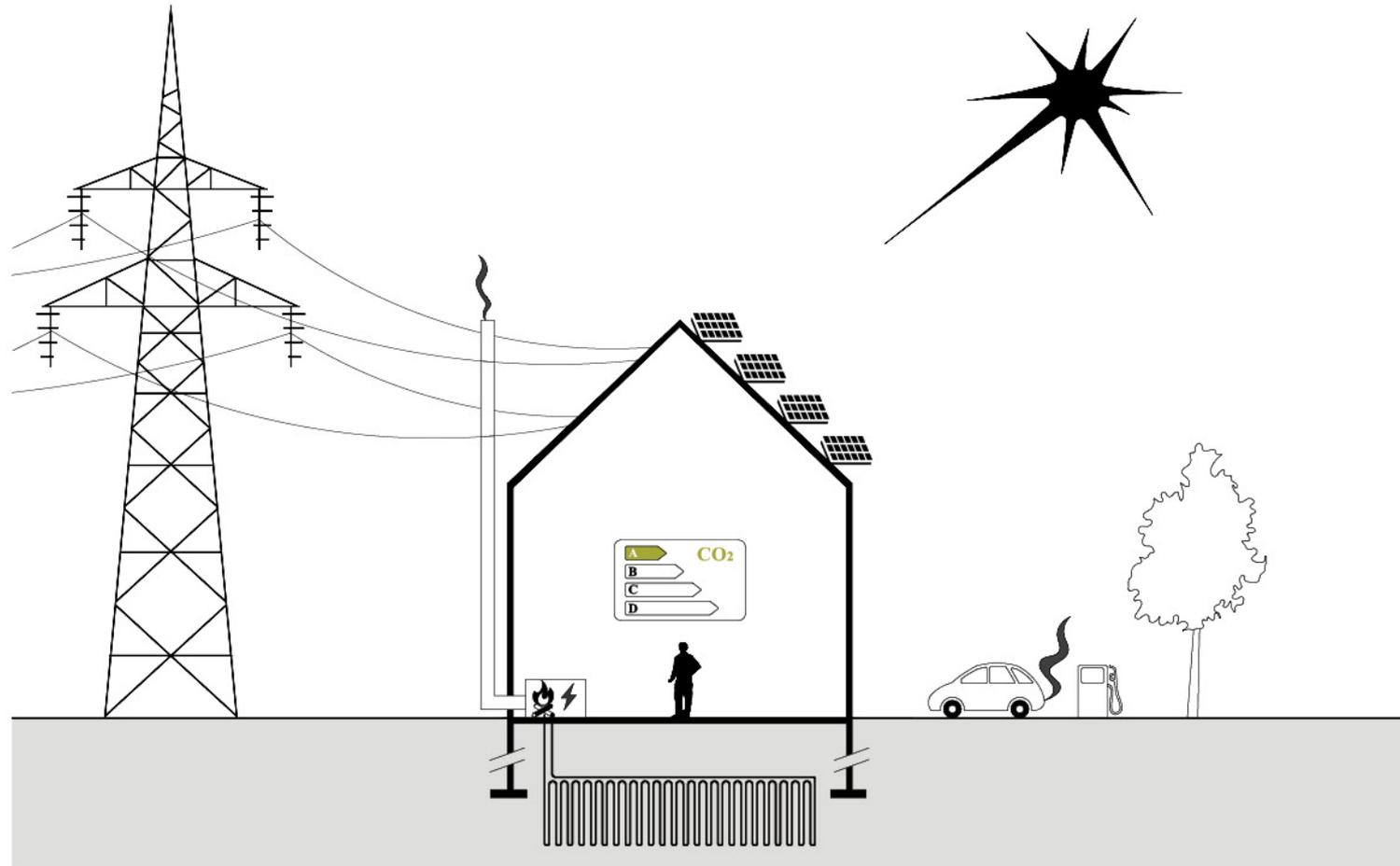
# Introduction – Stratégie 2050



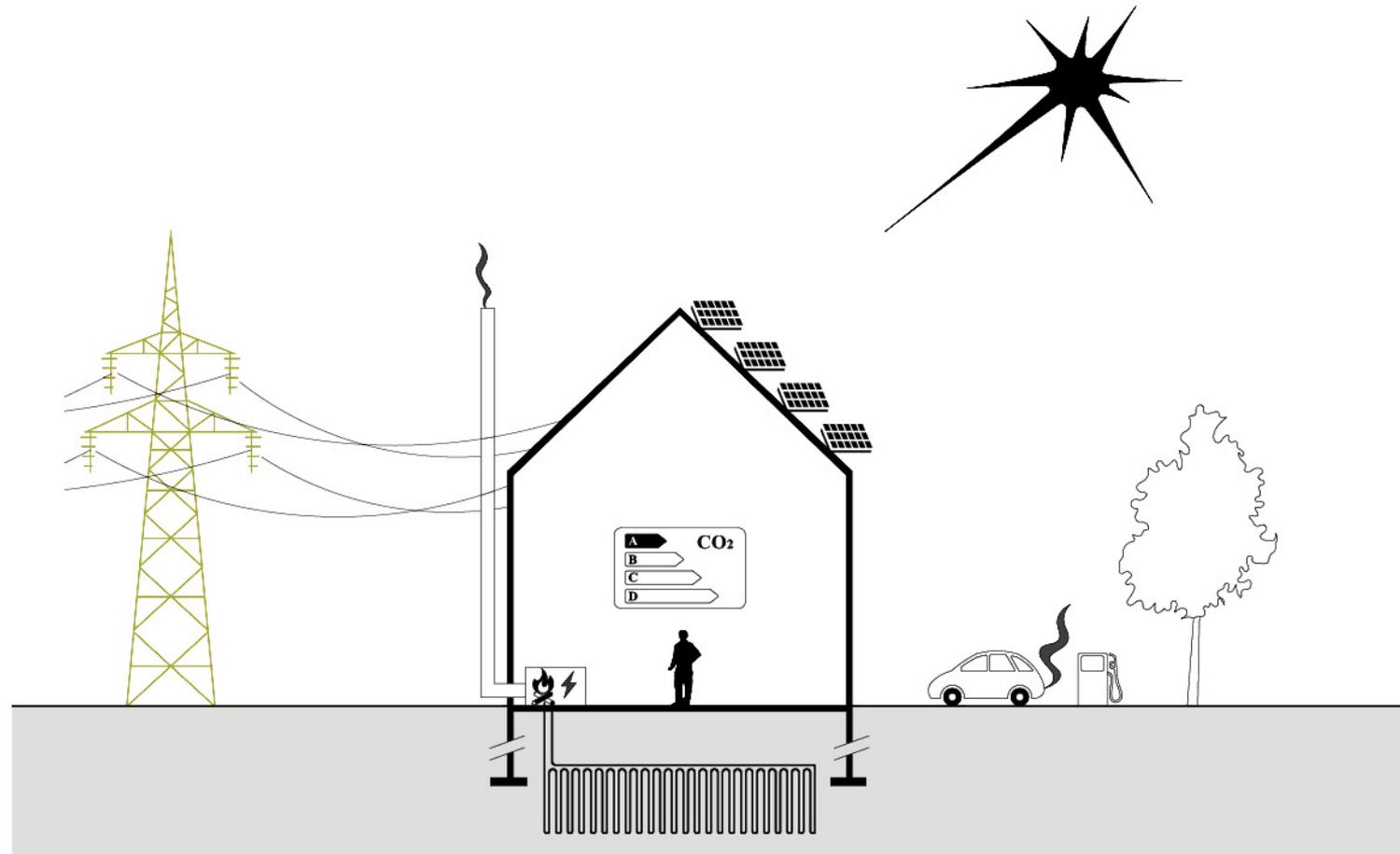
# Introduction – Stratégie 2050



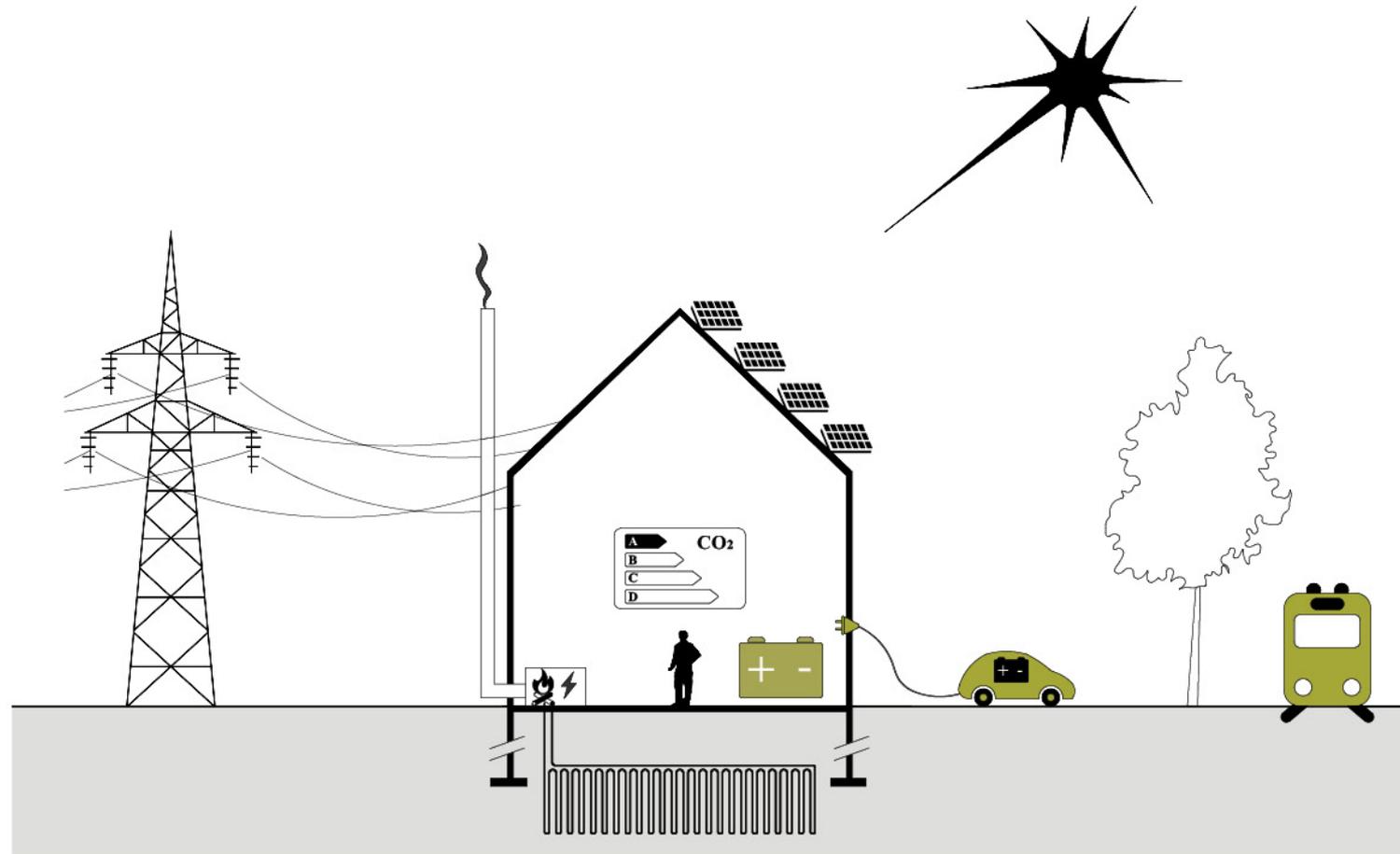
# Introduction – Stratégie 2050



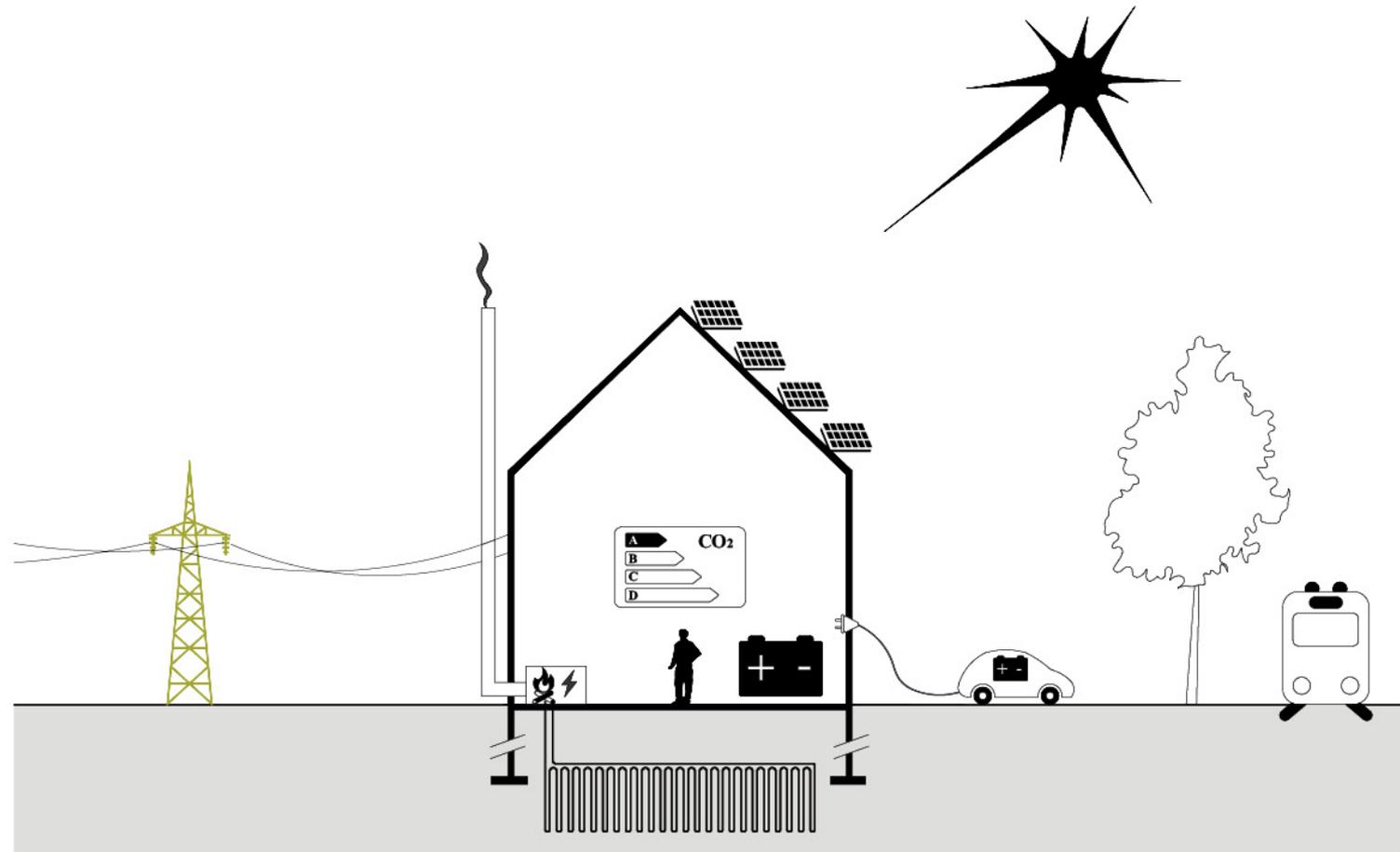
# Introduction – Stratégie 2050



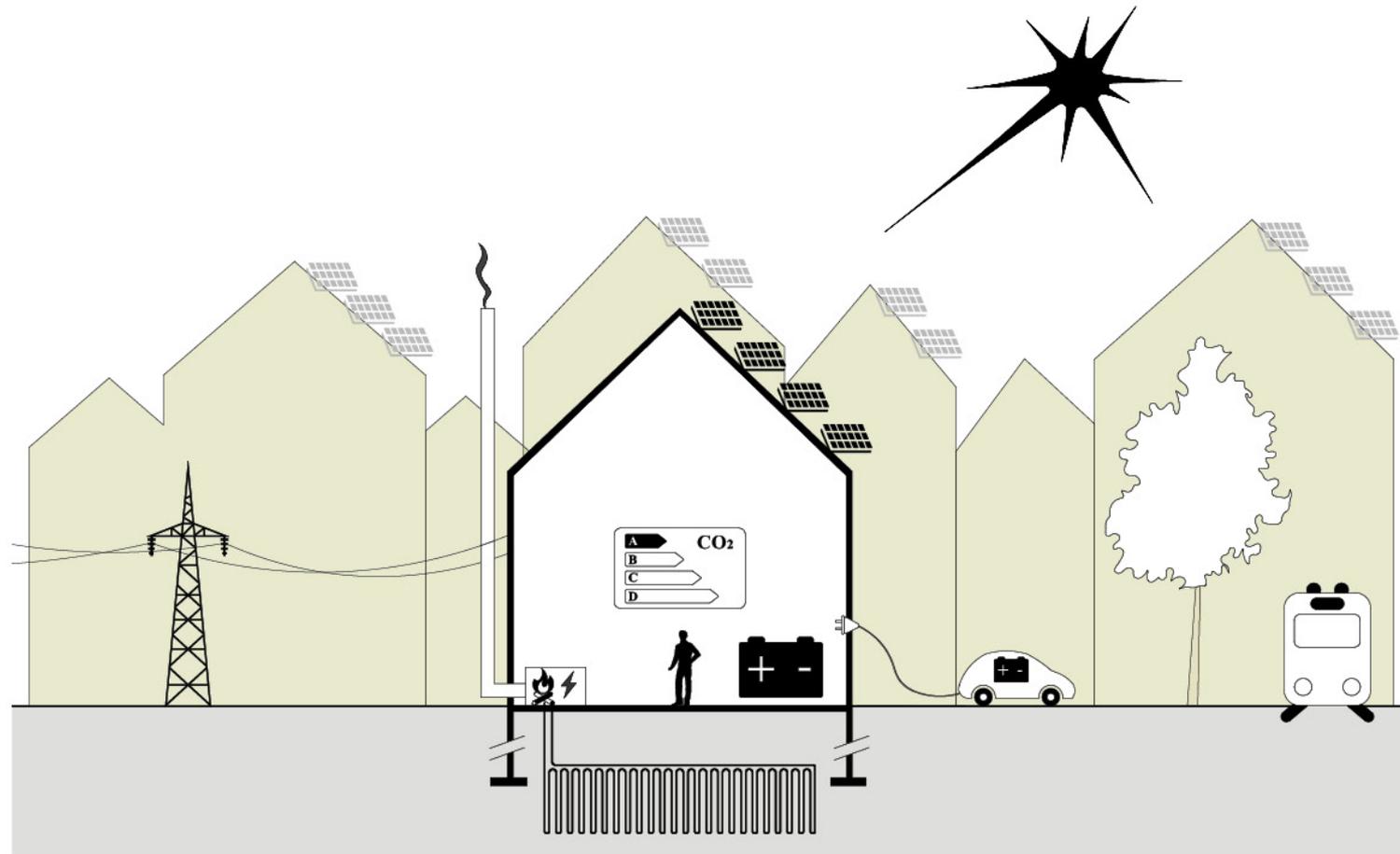
# Introduction – Stratégie 2050



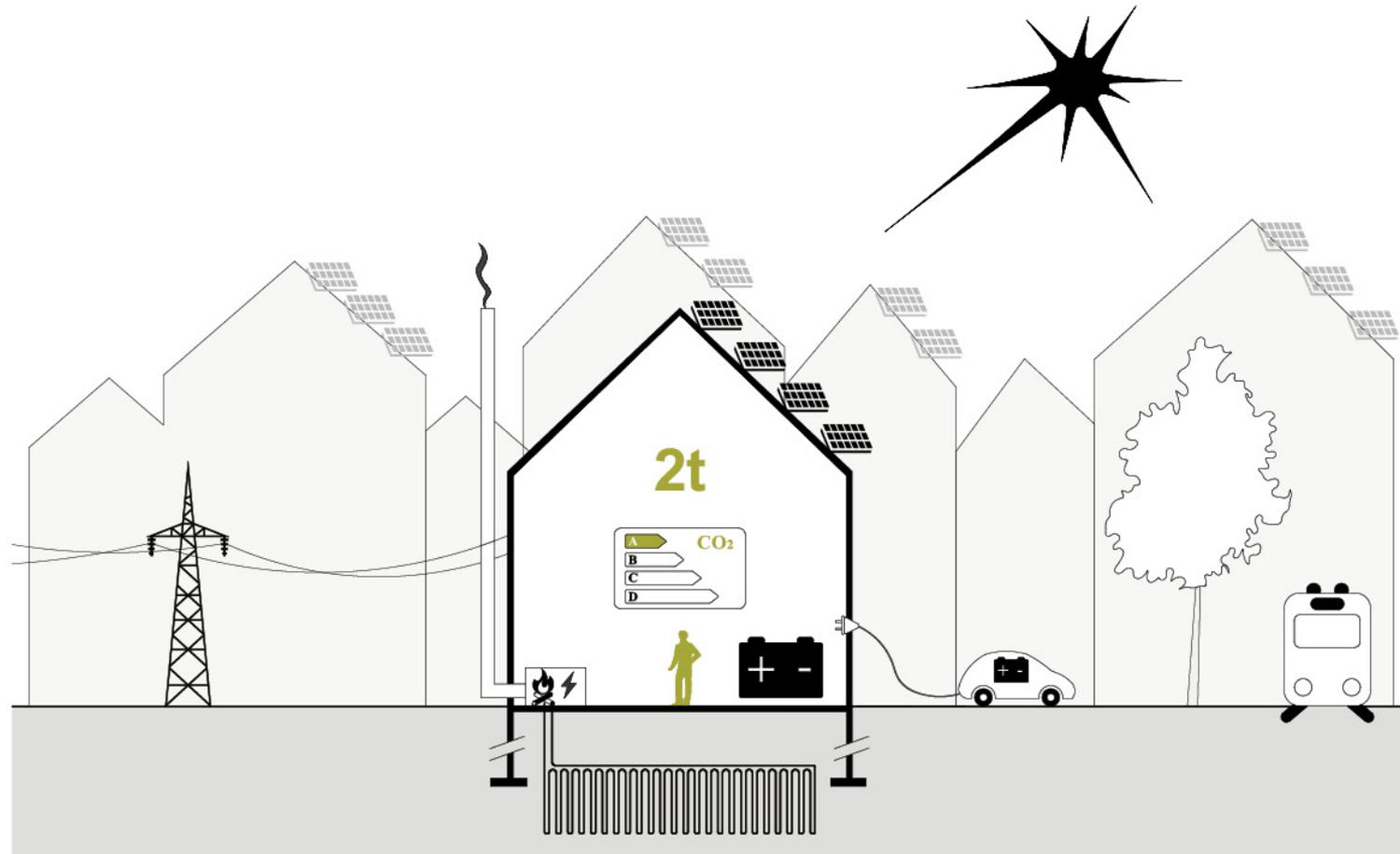
# Introduction – Stratégie 2050



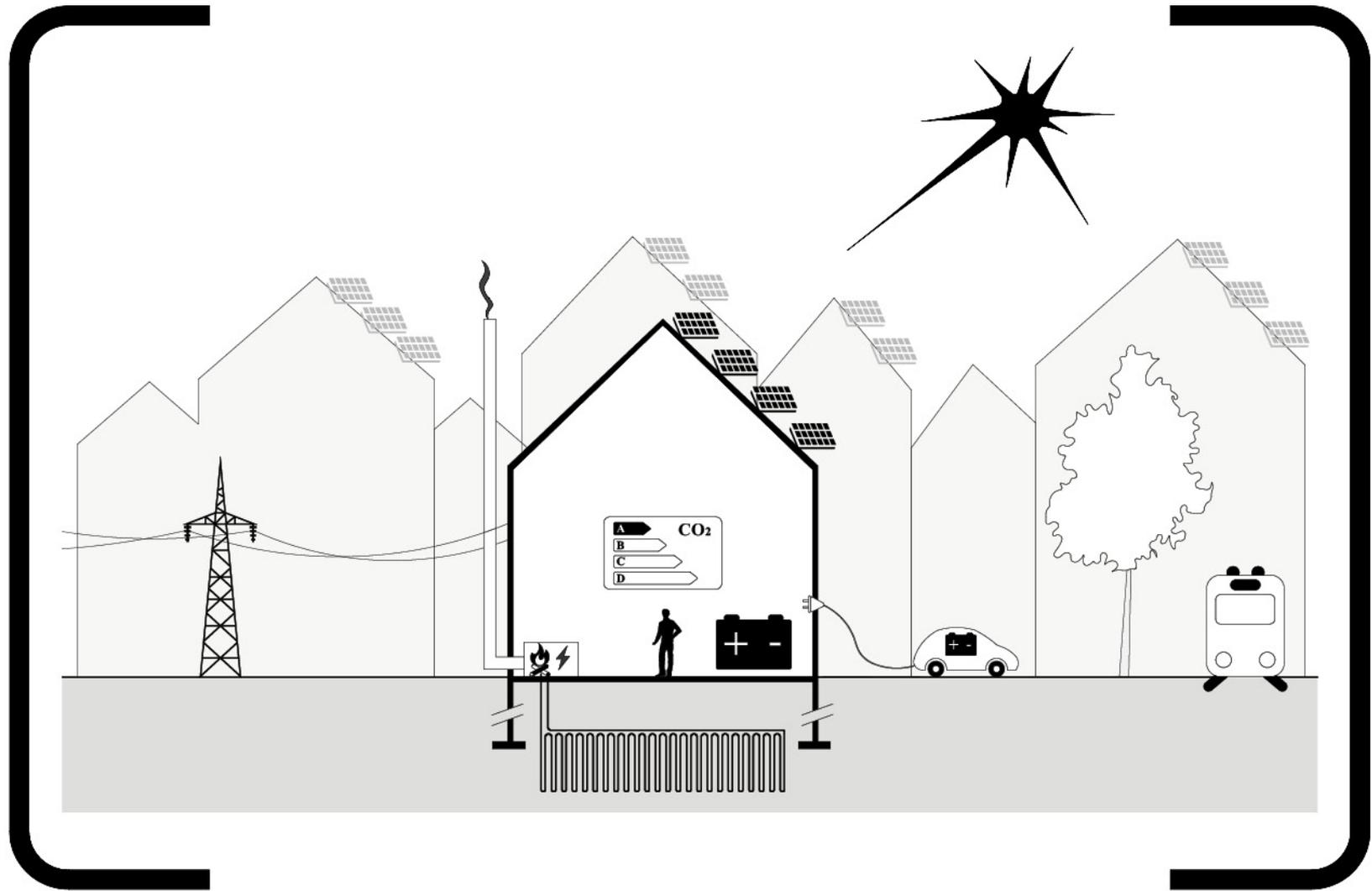
# Introduction – Stratégie 2050



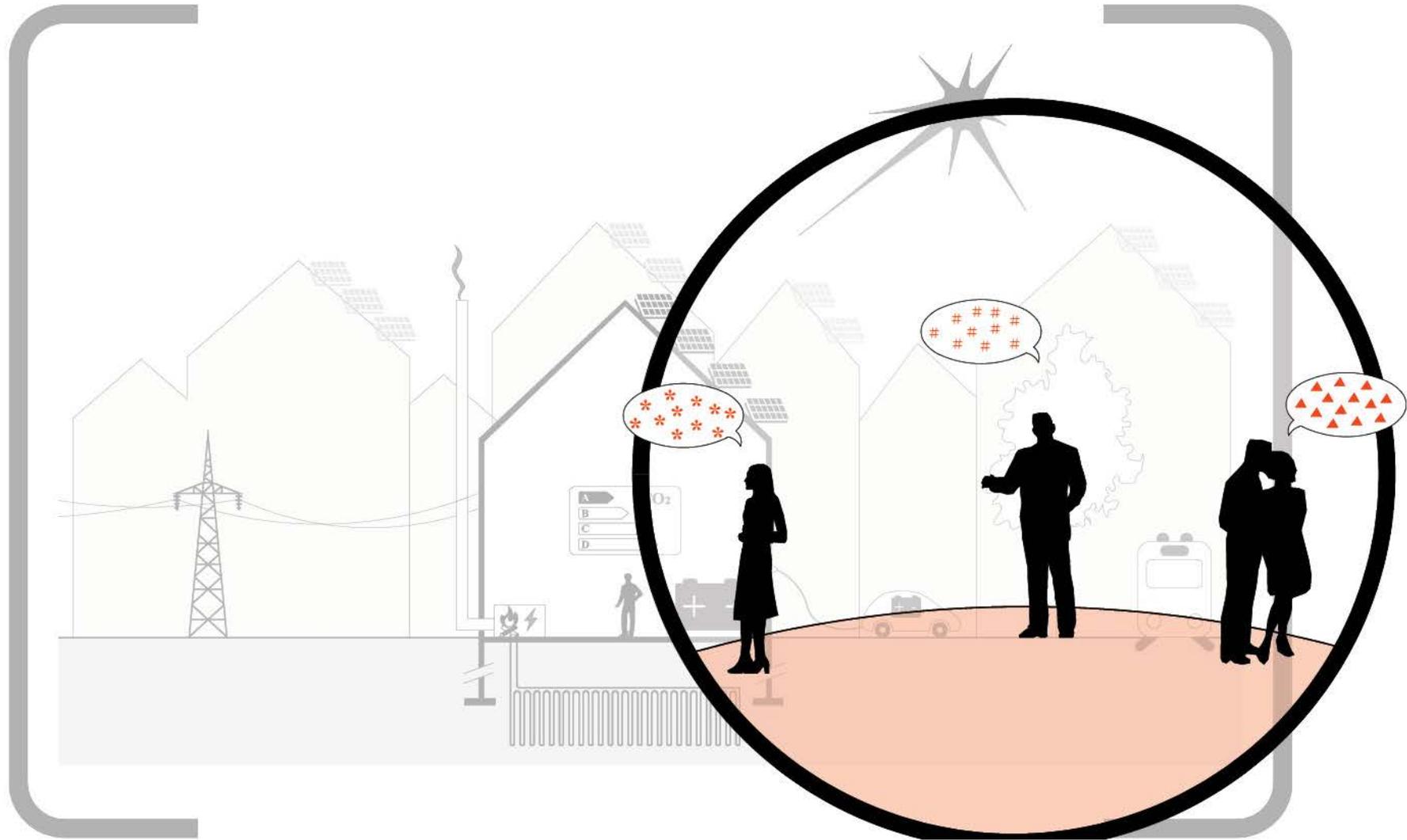
# Introduction – Stratégie 2050



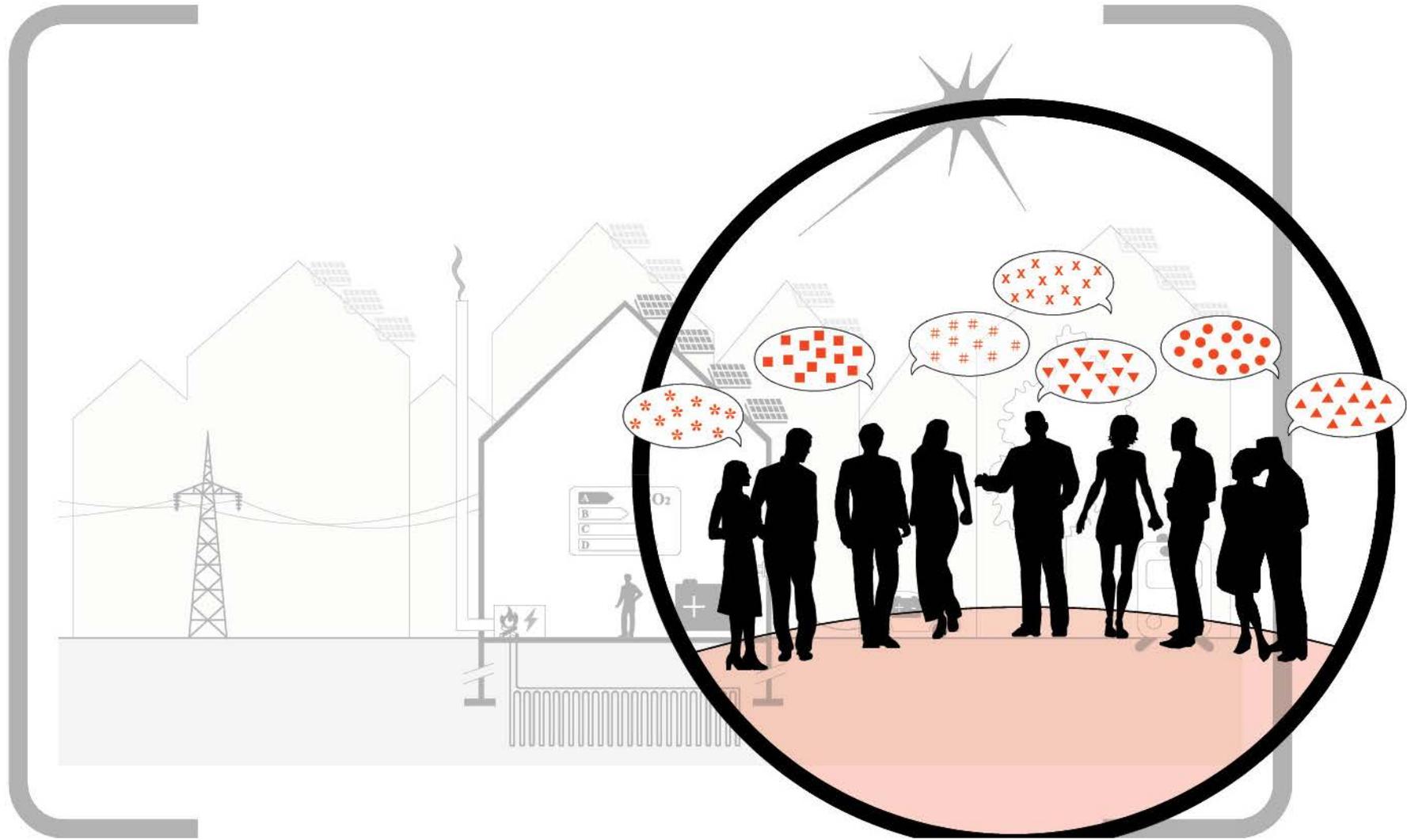
# Introduction – Stratégie 2050



# Introduction – Stratégie 2050



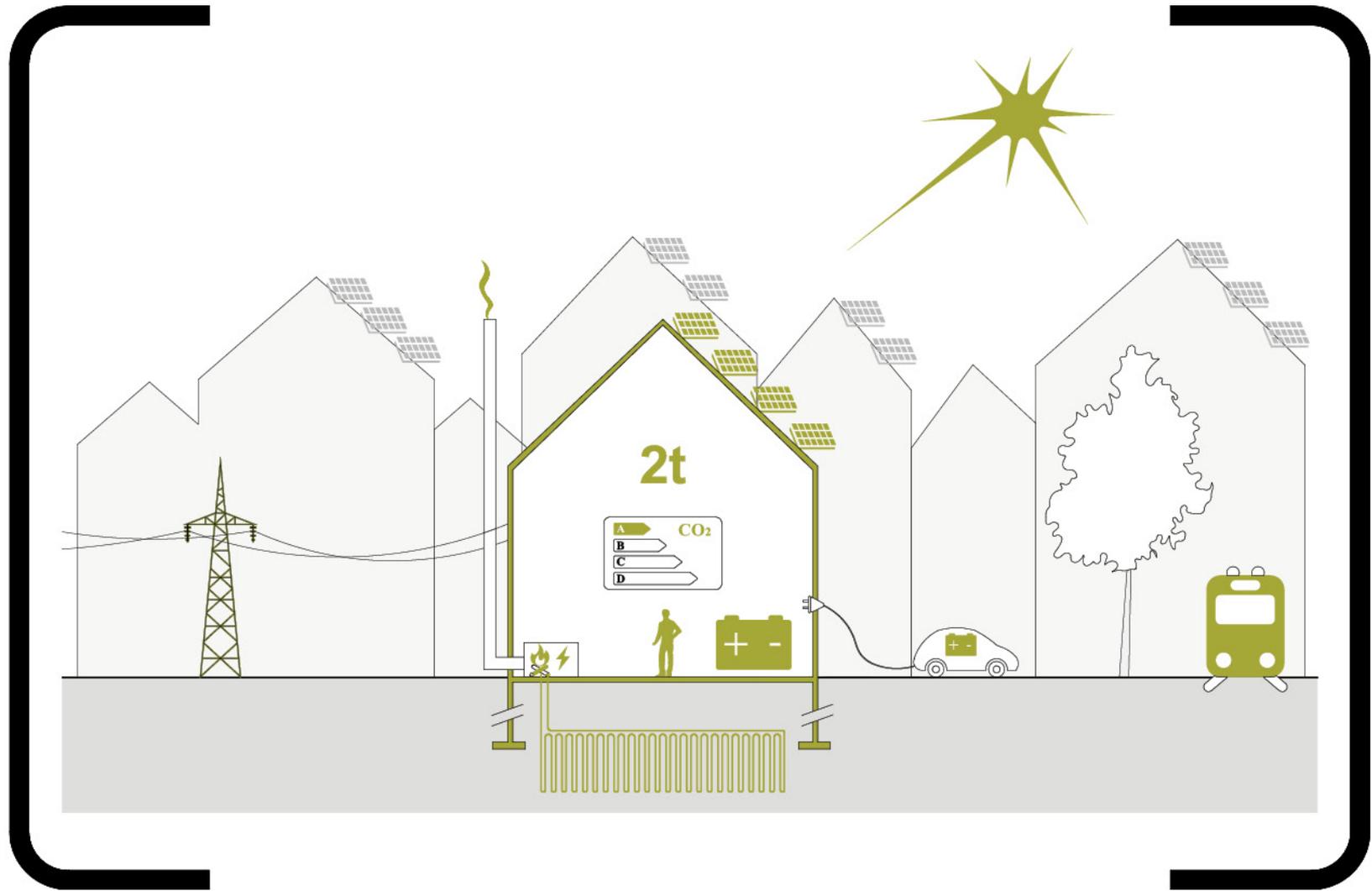
# Introduction – Stratégie 2050



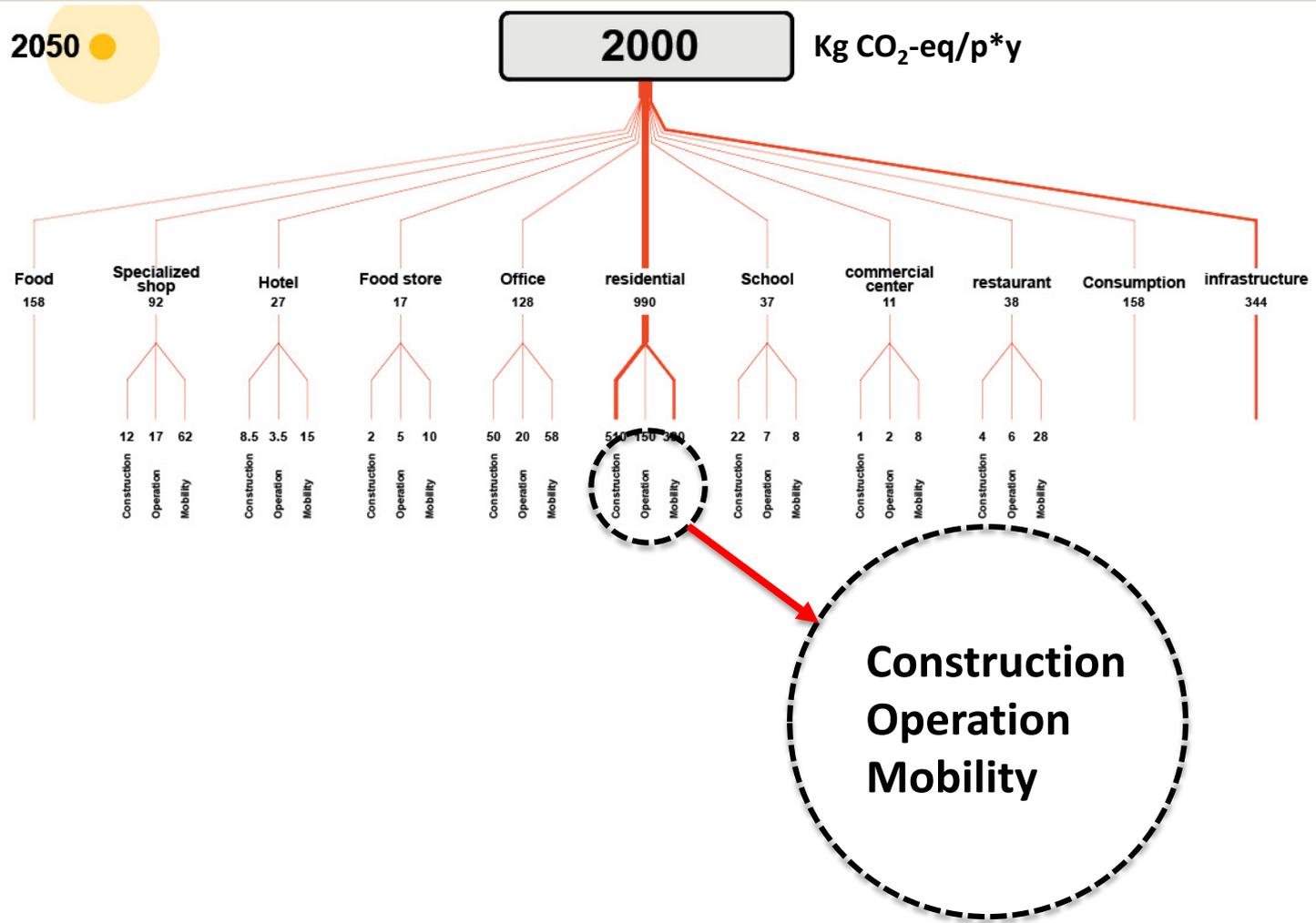
# Introduction – Stratégie 2050



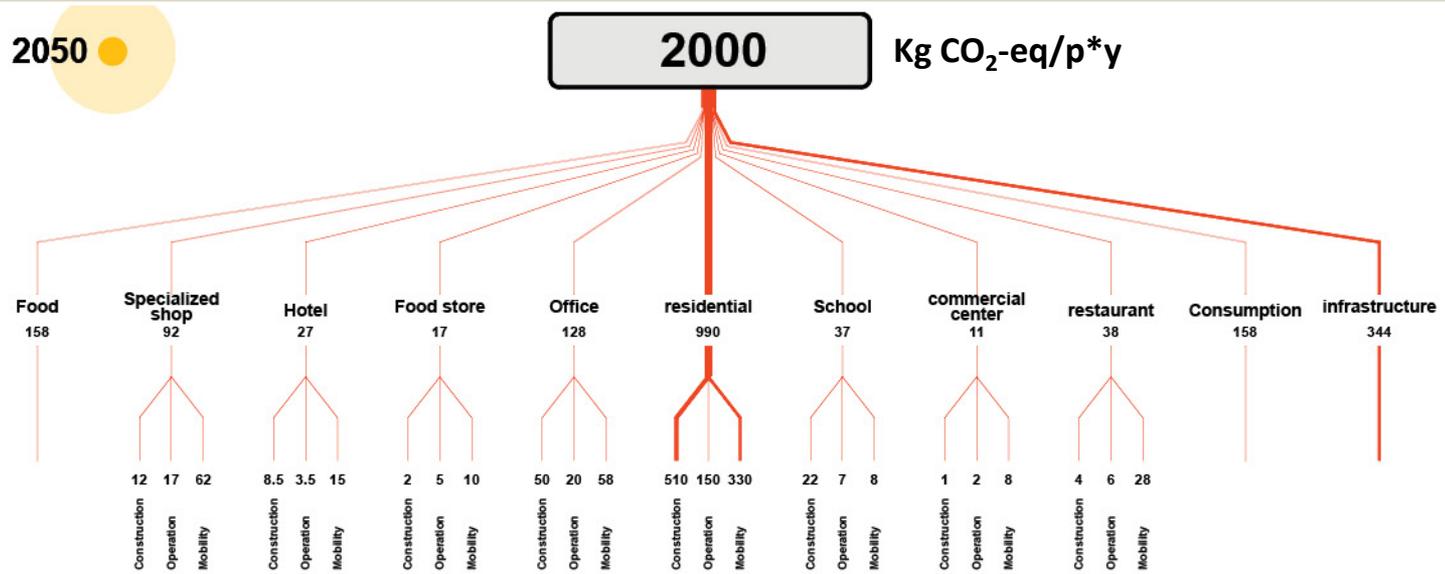
# Introduction – Stratégie 2050



# Introduction - Objectifs

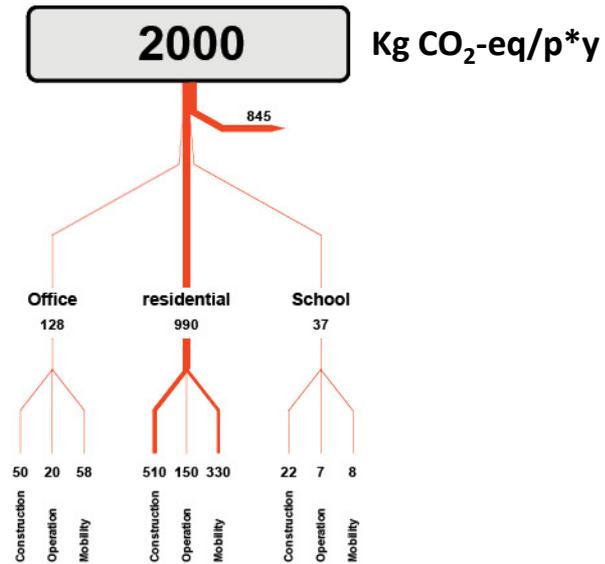


# Introduction - Objectifs



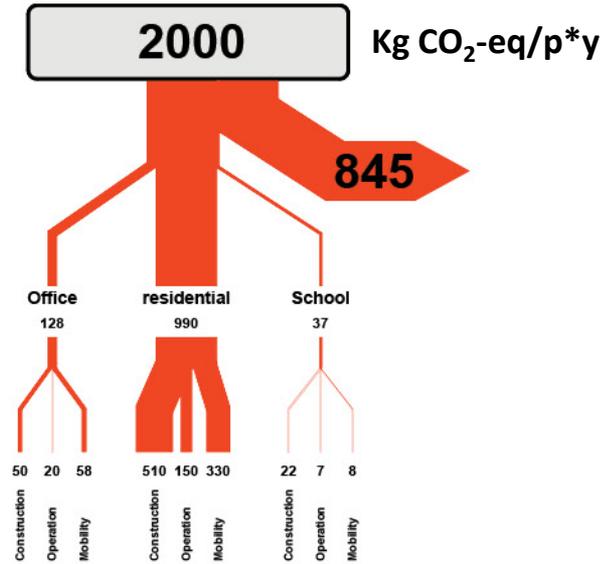
# Introduction - Objectifs

2050 ●

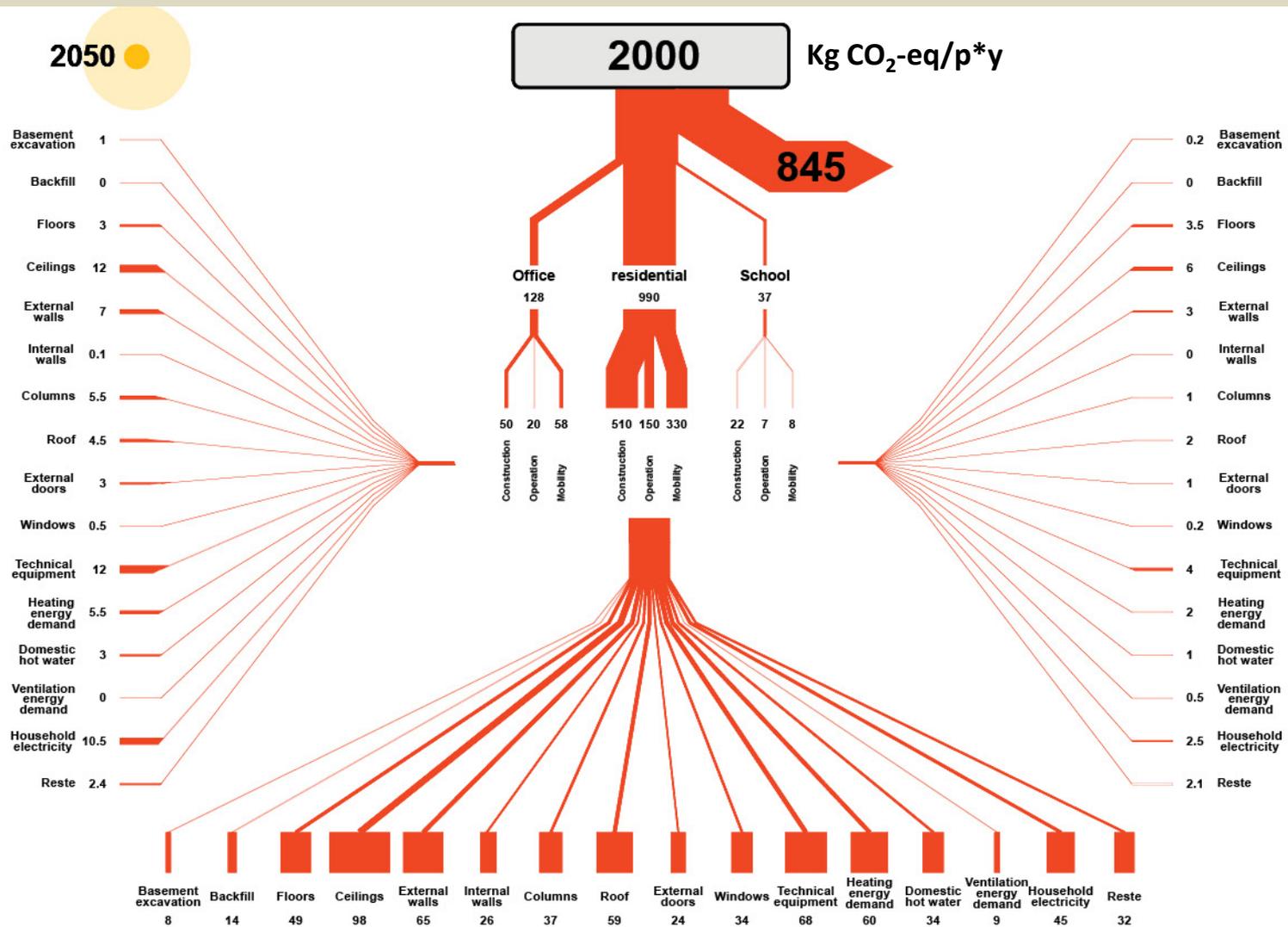


# Introduction - Objectifs

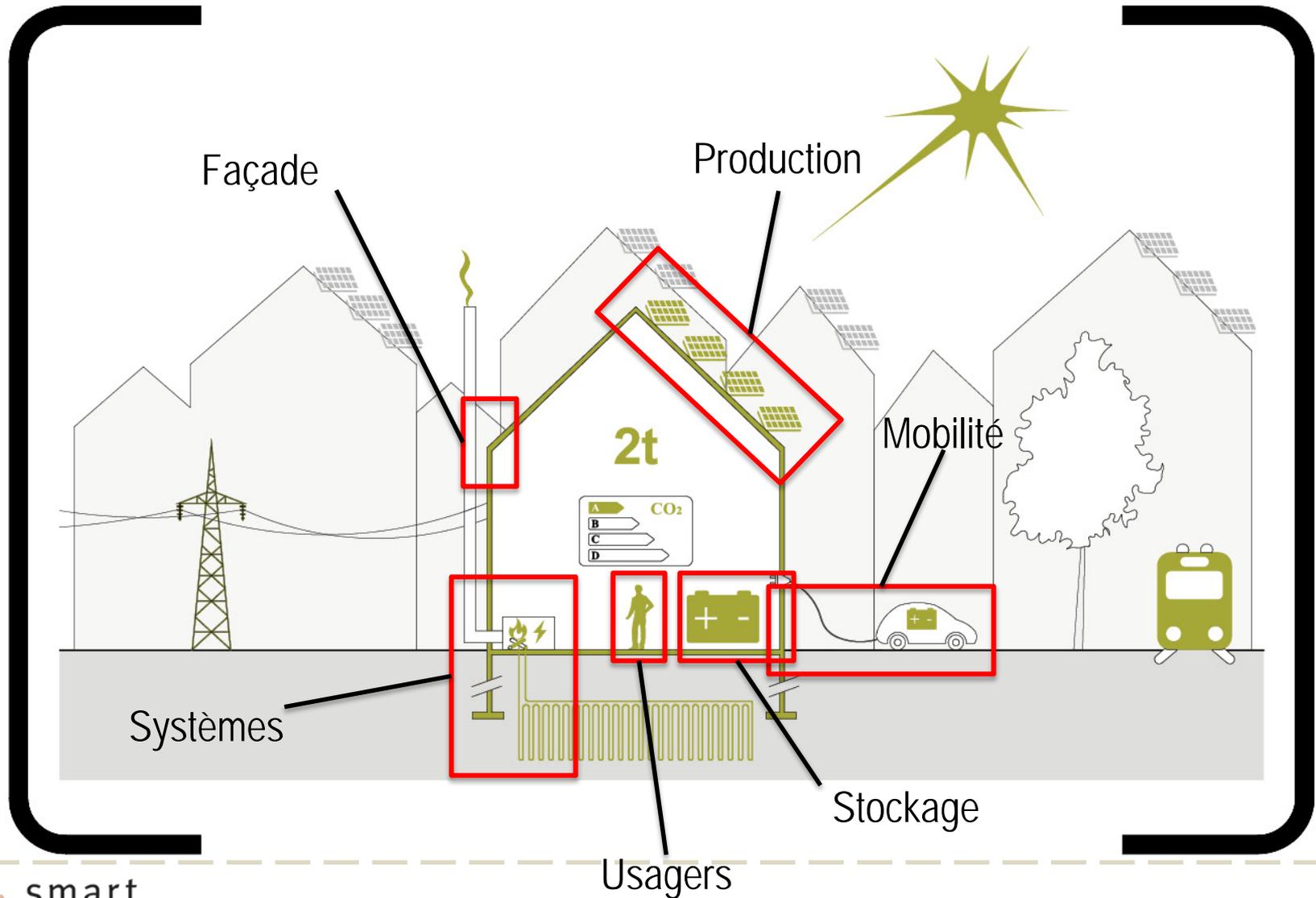
2050 ●



# Introduction - Objectifs



# Introduction – Organes vitaux





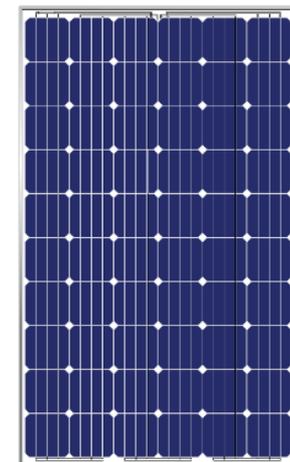
# Production d'énergie

# Production - Bilan carbone d'un capteur PV

L'analyse de cycle de vie d'un panneau photovoltaïque (PV) nous renseigne sur la durée nécessaire d'utilisation pour amortir le carbone investi dans le cycle de vie du panneau.



Energy.korea.com



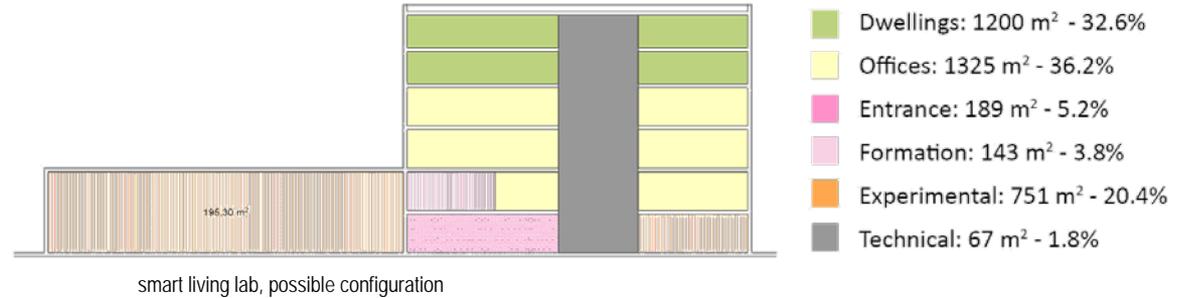
Herbsolar.com

## Estimation du pay-back Carbone

Production électrique de 1 kWp à Fribourg	1120 kWh/an
Emissions CO <sub>2</sub> pour produire 1 kWp	1940 kg CO <sub>2</sub> eq [1]
Dure de vie PV	25 ans
Contenu CO <sub>2</sub> par kWh consommé du réseau CH	0,1375 kg CO <sub>2</sub> eq / kWh [1]
Temps nécessaire au remboursement du CO <sub>2</sub>	25 ans
Temps nécessaire pour égaler la performance du réseau	12,5 ans

[1] KBOB, 2014

# Production - Net Zero Energy Building



Source	GJ/an
PV toiture	192.6
PV façade sud	62.6
PV façade ouest	137.1
PV façade est	137.1
<i>Total</i>	<i>529.3</i>

Pour transformer le smart living lab en un bâtiment à énergie 0 à l'aide de photovoltaïque, il faudrait recouvrir :

- Entièrement la toiture
- 80% des surfaces sud, est et ouest

Pour un total de 2024 m<sup>2</sup>

La demande électrique du bâtiment est calculée sur la base des normes SIA

# Production - Emissions réelles de CO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> d'un bâtiment 0 énergie ne sont pas égales à zéro. Ses émissions sont liées à l'énergie grise de l'installation photovoltaïque.

g CO <sub>2</sub> /MJ	Source
84,5	PV façade nord
38,5	Mix final utilisateurs CH
33,4	PV façade ouest
32,6	PV façade est
23,6	PV façade sud
15,7	PV toiture (35°-sud)

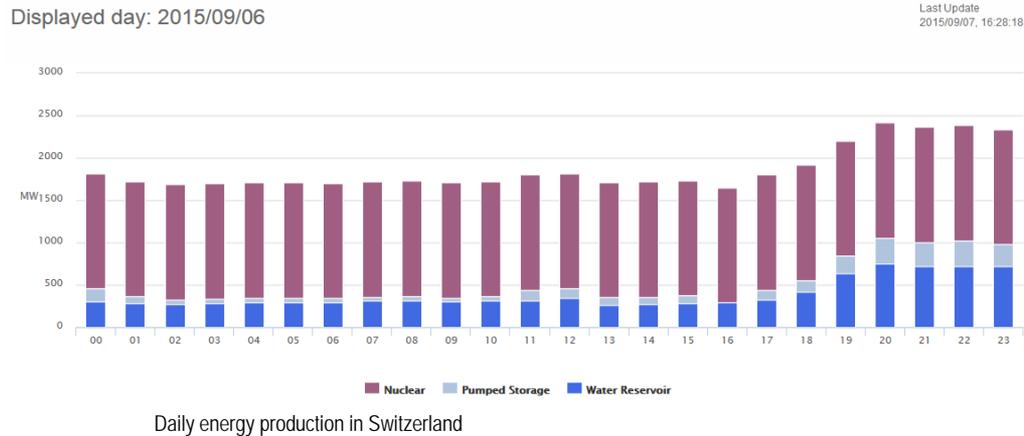
Contenu CO<sub>2</sub> de l'électricité  
pour différentes orientation des PV

Pour fournir en électricité le smart living lab  
(529.24 GJ/year), seront émis:

- **20'376** kg CO<sub>2</sub>/an avec le réseau électrique Suisse
- Ou
- **13'544** kg CO<sub>2</sub>/ an en utilisant des capteurs PV

# Production - contenu carbone dynamique

Le contenu carbone de l'électricité produit en Suisse peut varier du simple au double sur la même journée

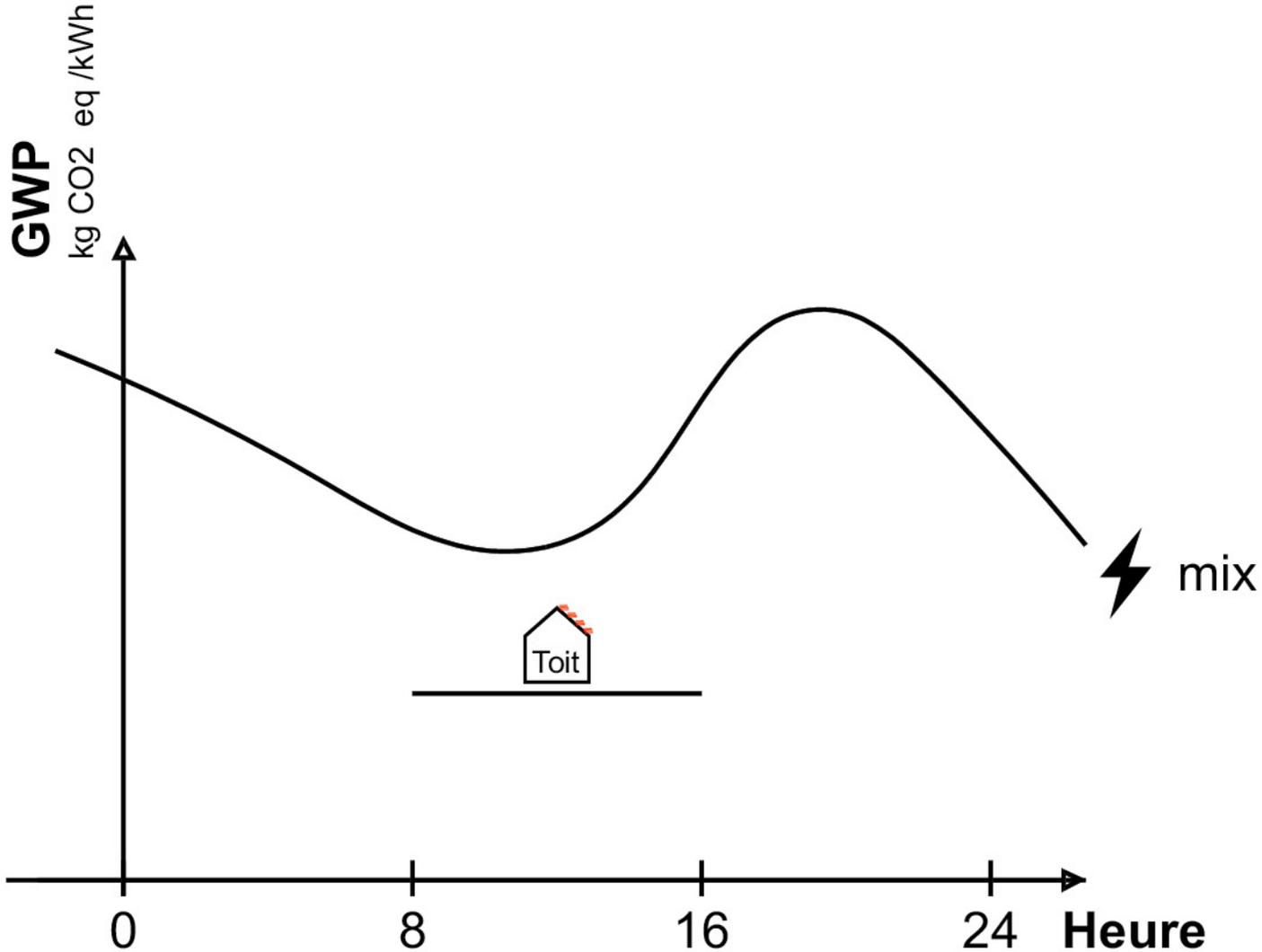


Source	kg CO <sub>2</sub> /an
MIX CH utilisateur	20'376
Electricité produite par PV	13'544
production CH à 20:00	5'943
production CH à 16:00	3'181

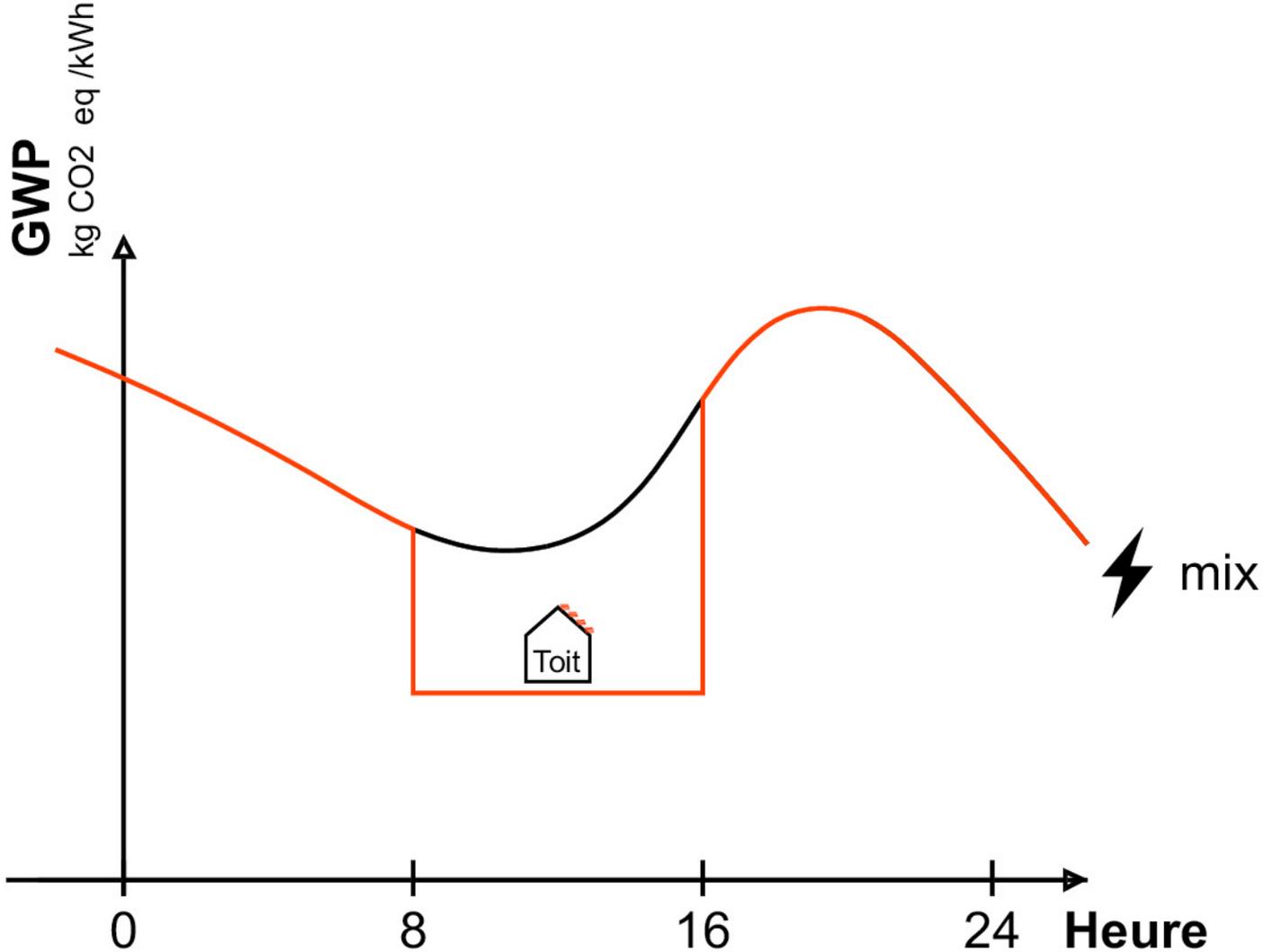
*Emission de CO<sub>2</sub> pour la demande d'électricité du Smart living lab*

Une analyse dynamique du contenu carbone de l'électricité du réseau est nécessaire pour optimiser les choix en temps réel.

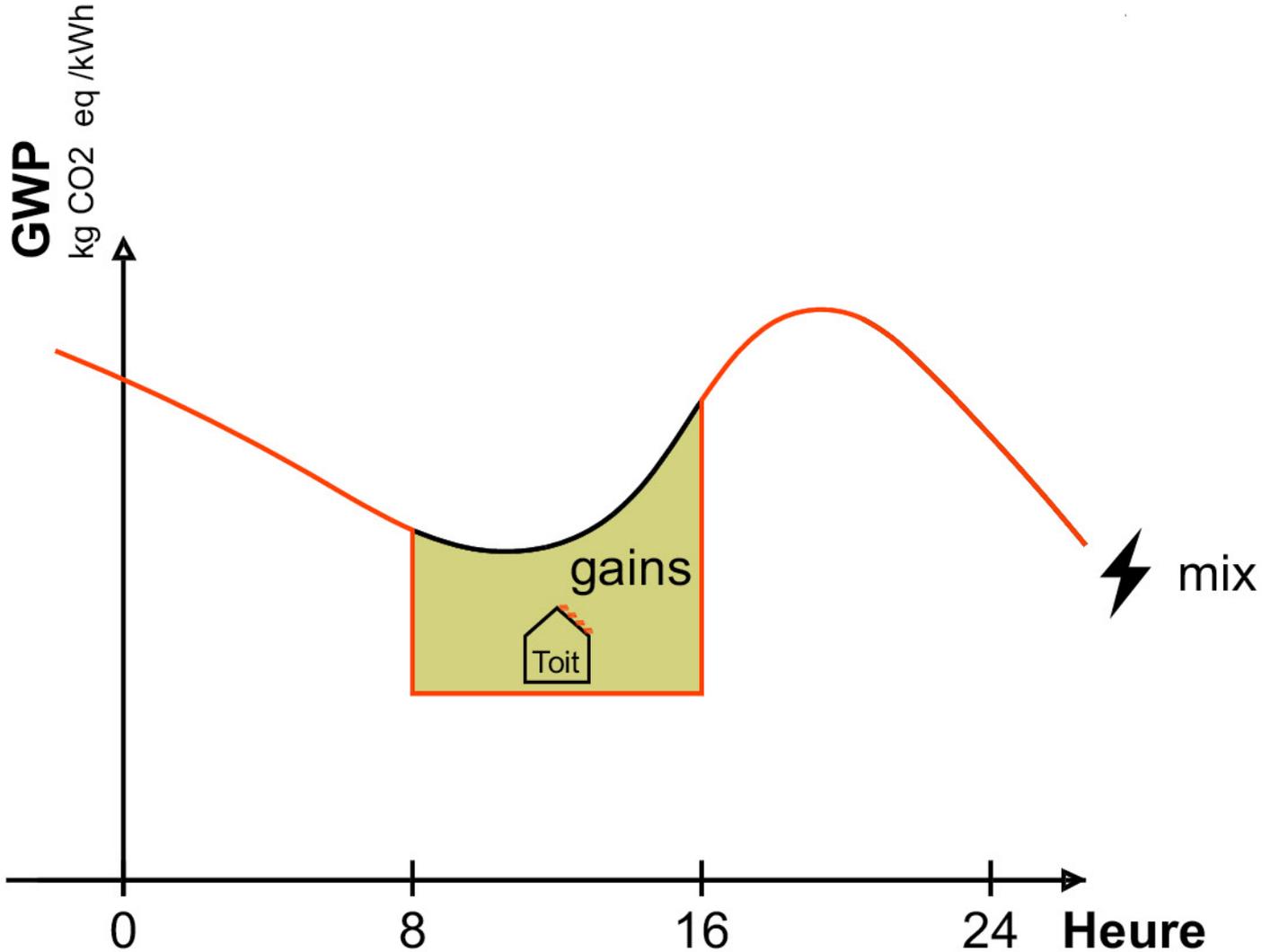
# Production - contenu carbone dynamique



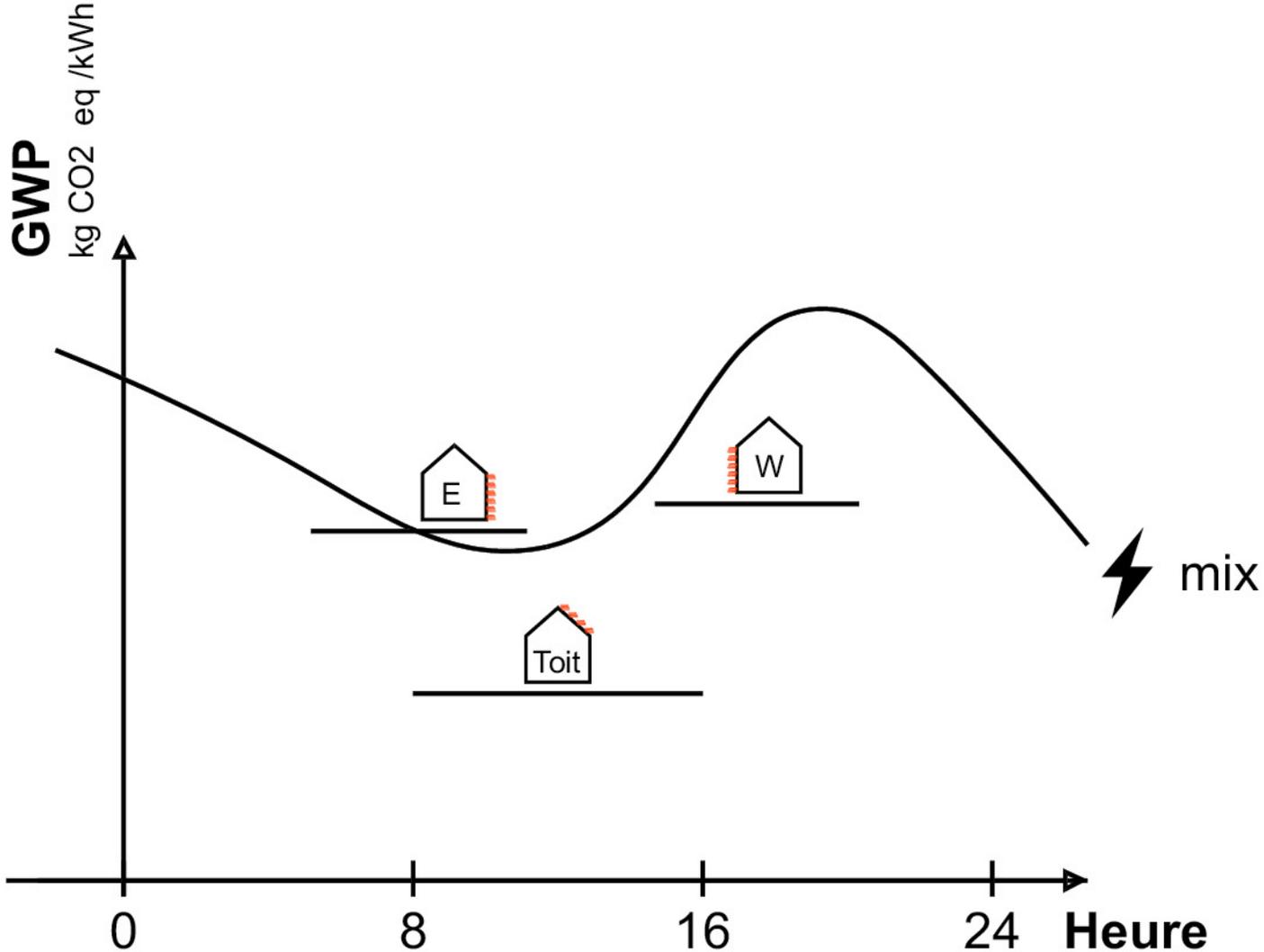
# Production - contenu carbone dynamique



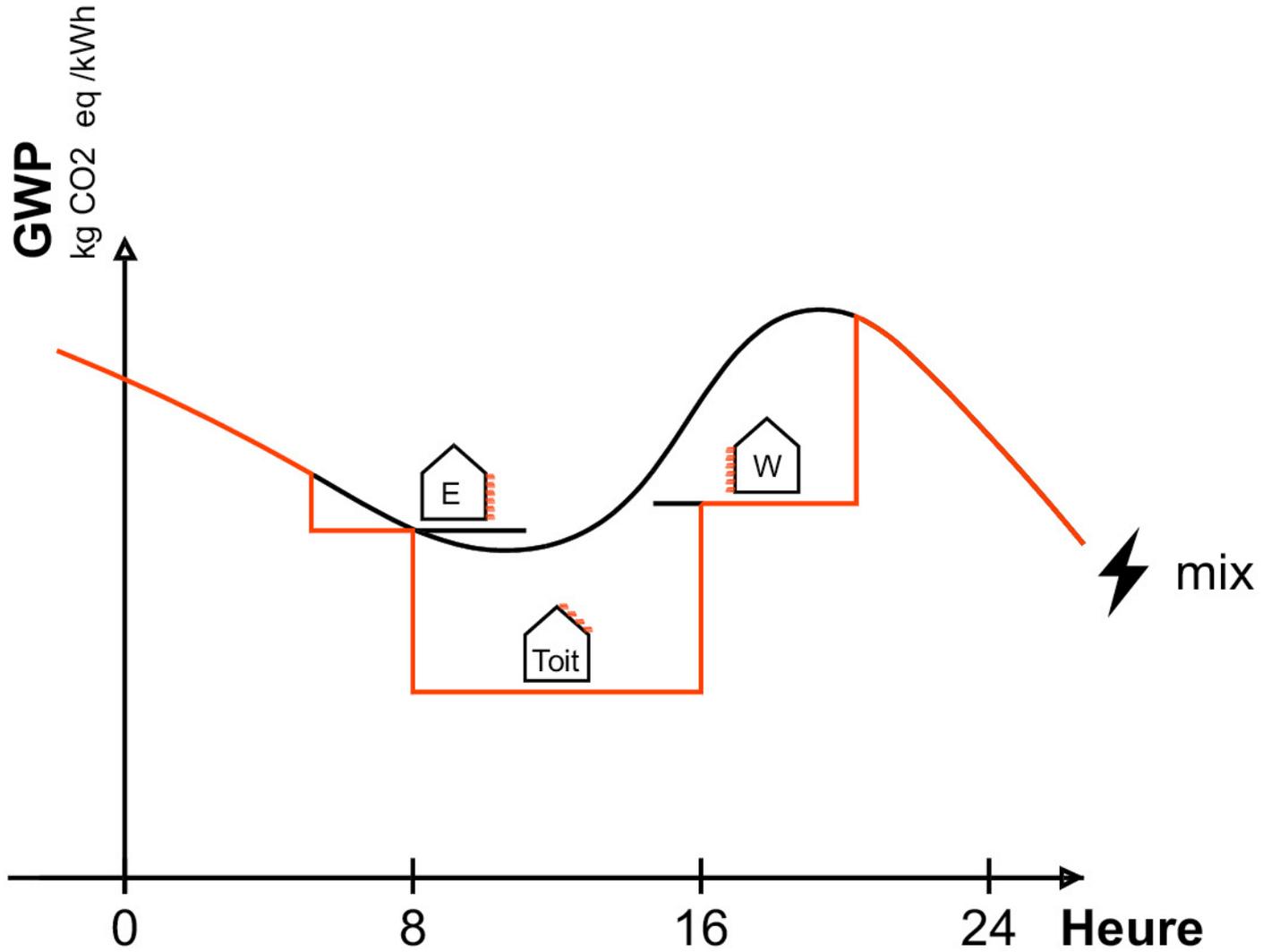
# Production - contenu carbone dynamique



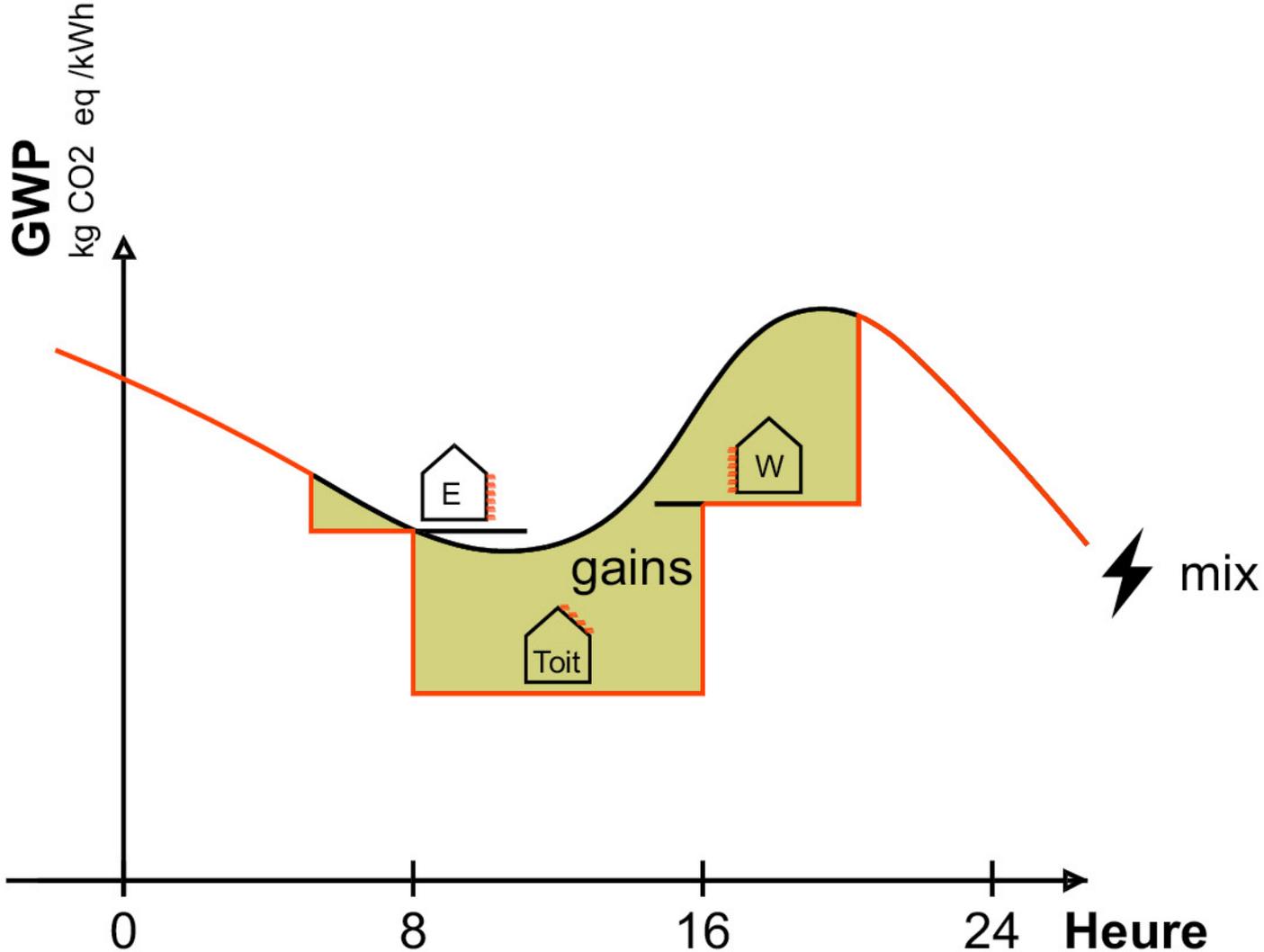
# Production - contenu carbone dynamique



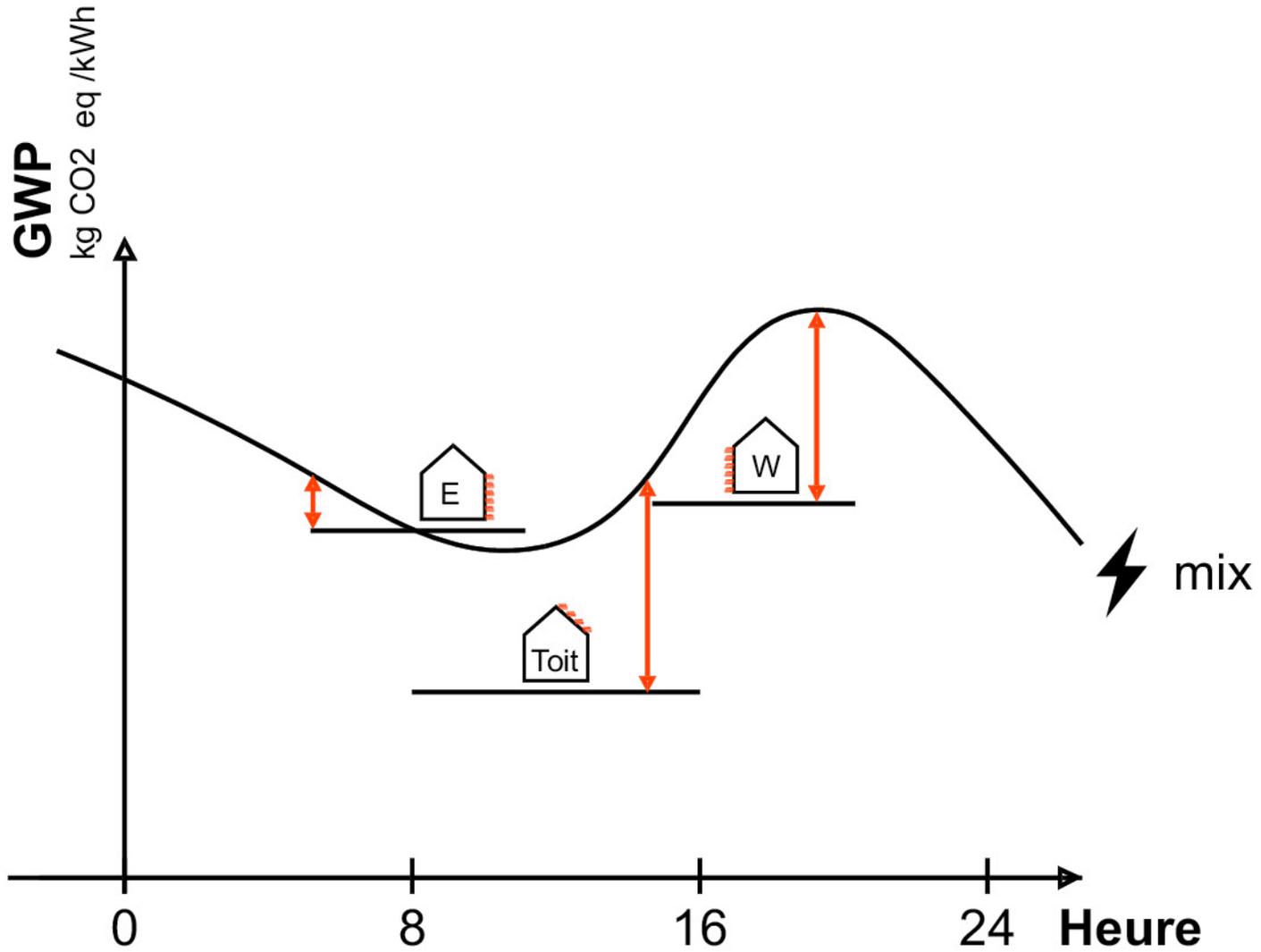
# Production - contenu carbone dynamique



# Production - contenu carbone dynamique

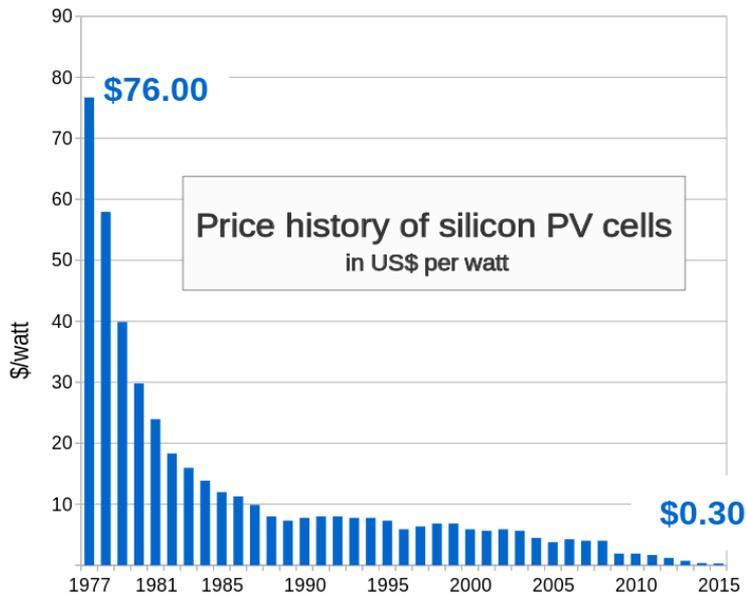


# Production - contenu carbone dynamique



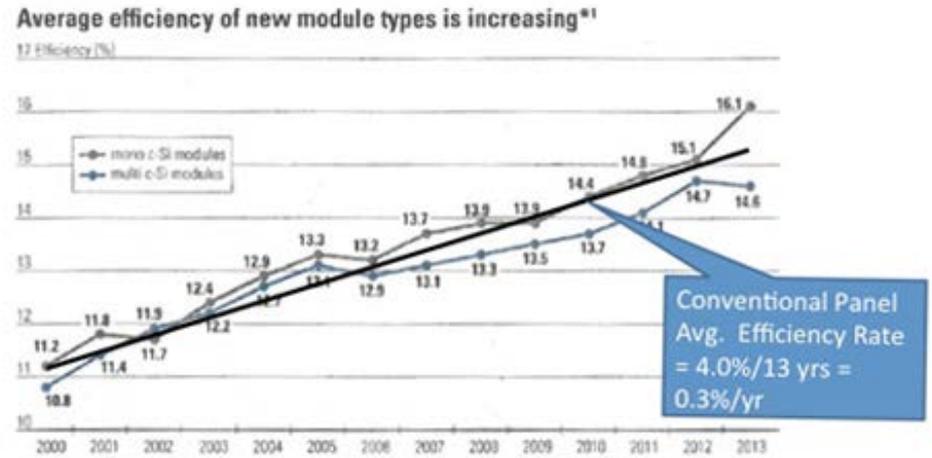
# Production – évolution photovoltaïque

## Evolution des prix



Bloomberg, 2015

## Evolution de l'efficacité



Siemer and Knoll, 2013

# Production – PV = composant de l'architecture ?



Mario Cucinella Architects

# Production – PV = composant de l'architecture ?



*Institute for Advanced  
Architecture of Catalonia*

# Production – PV = composant de l'architecture ?



Negroni Archivision

# Production – PV = composant de l'architecture ?



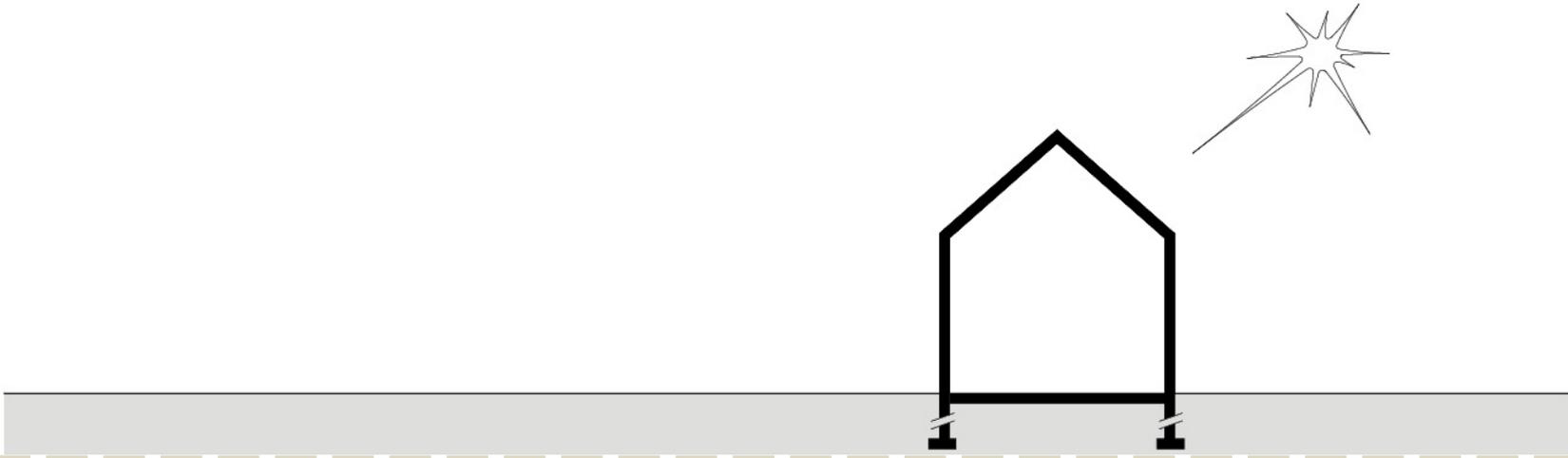
Baumschlager +  
Eberle Arch.

- La production d'une « **énergie propre** » est essentielle pour la performance carbone d'un bâtiment.
- Les sources d'énergies sont **multiples**.
- Leur contenu carbone est statique ou **dynamique**.
- Leur performance est **dépendante** de celle du réseau, qui va évoluer dans le temps.
- Cette dynamique devrait **impacter** l'architecture de demain.

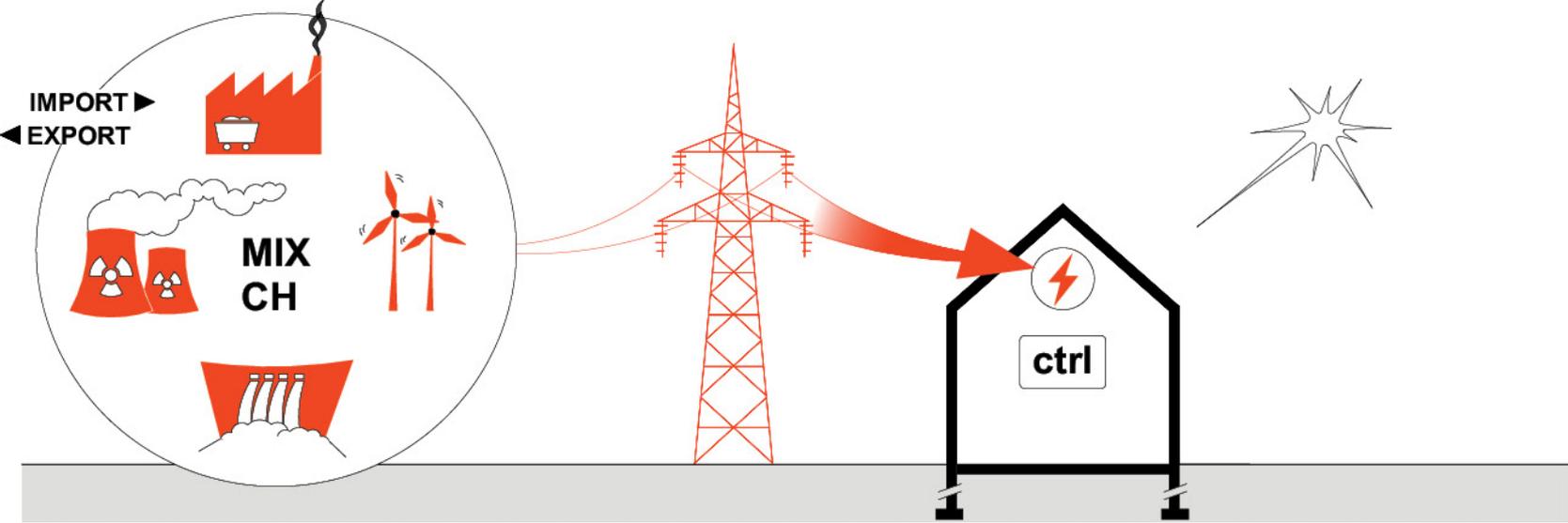


# Stockage d'énergie

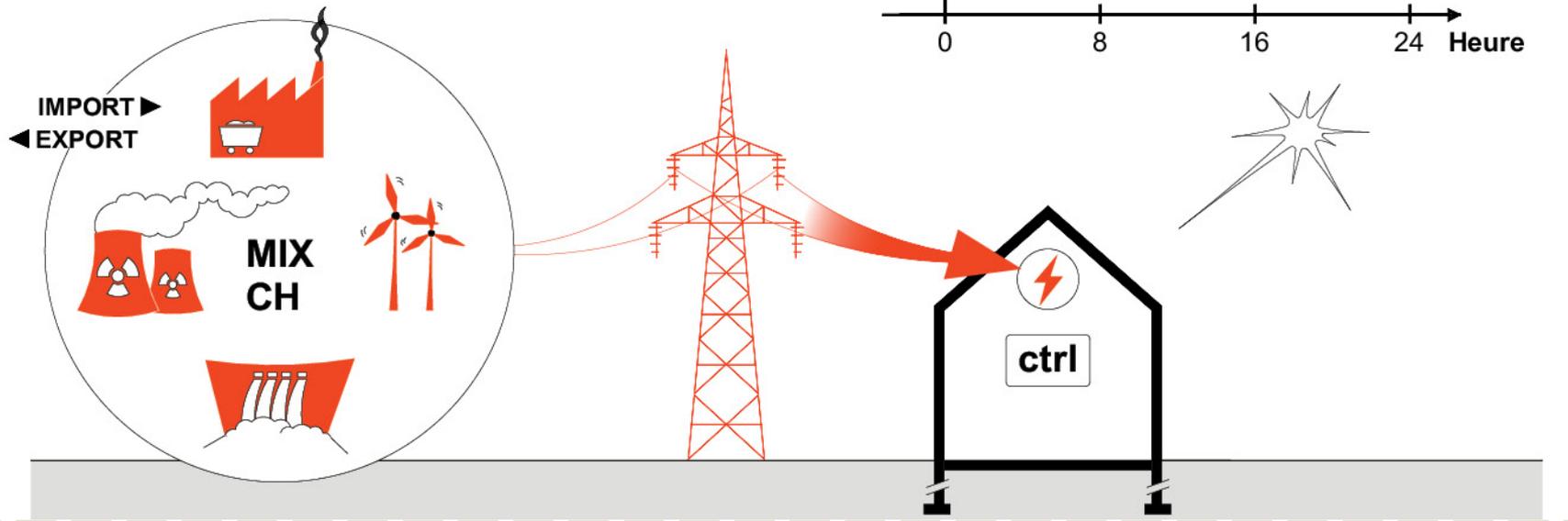
# Stockage - Principe



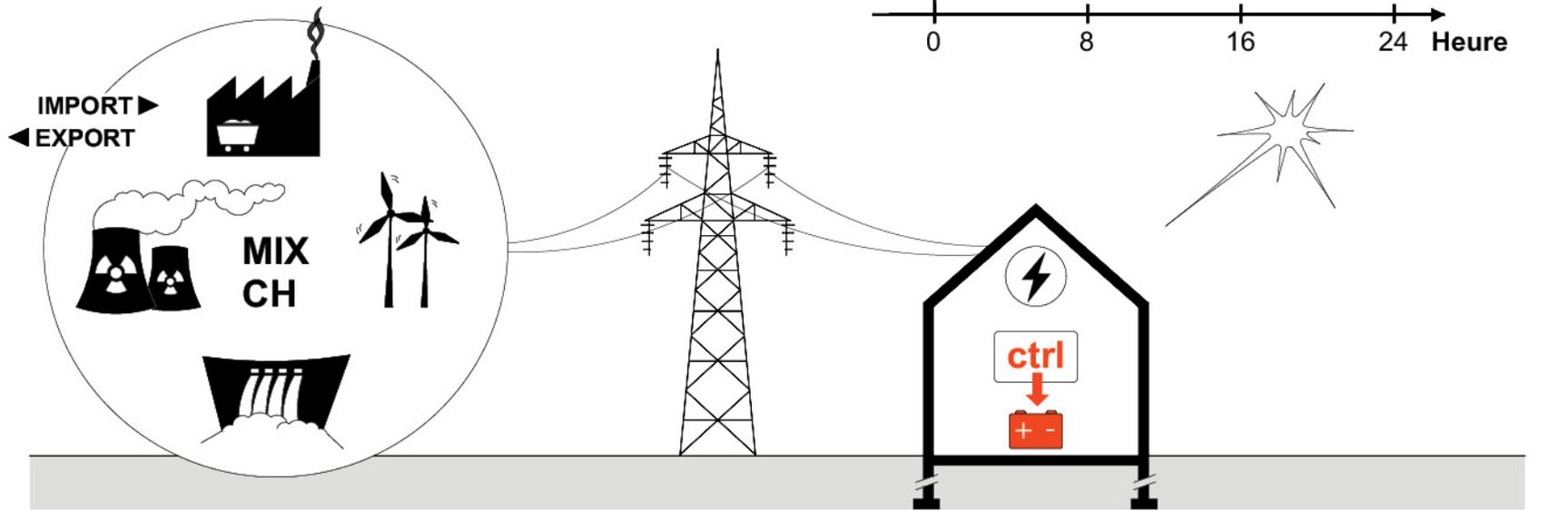
# Stockage - Principe



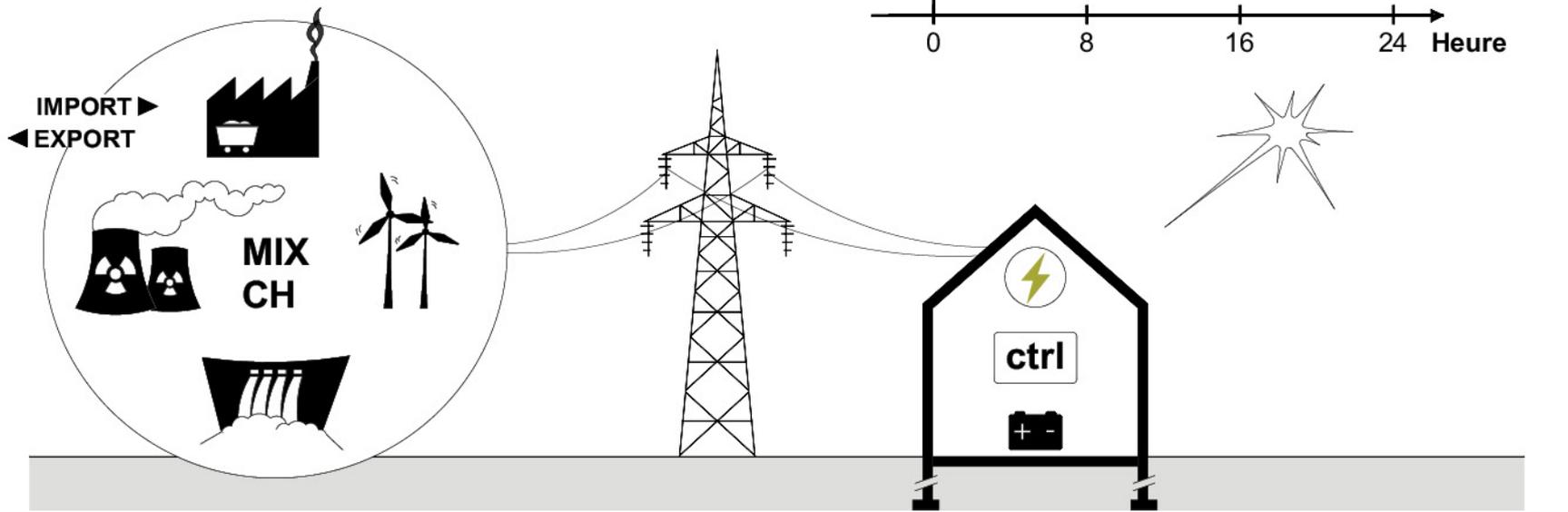
# Stockage - Principe



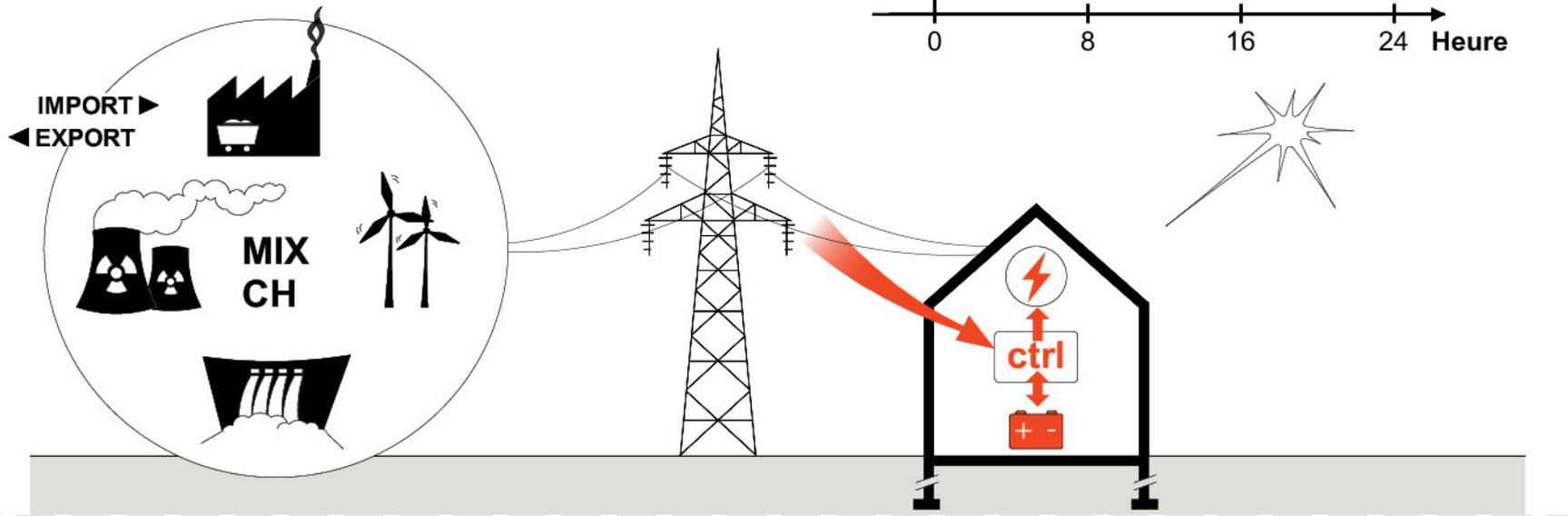
# Stockage - Principe



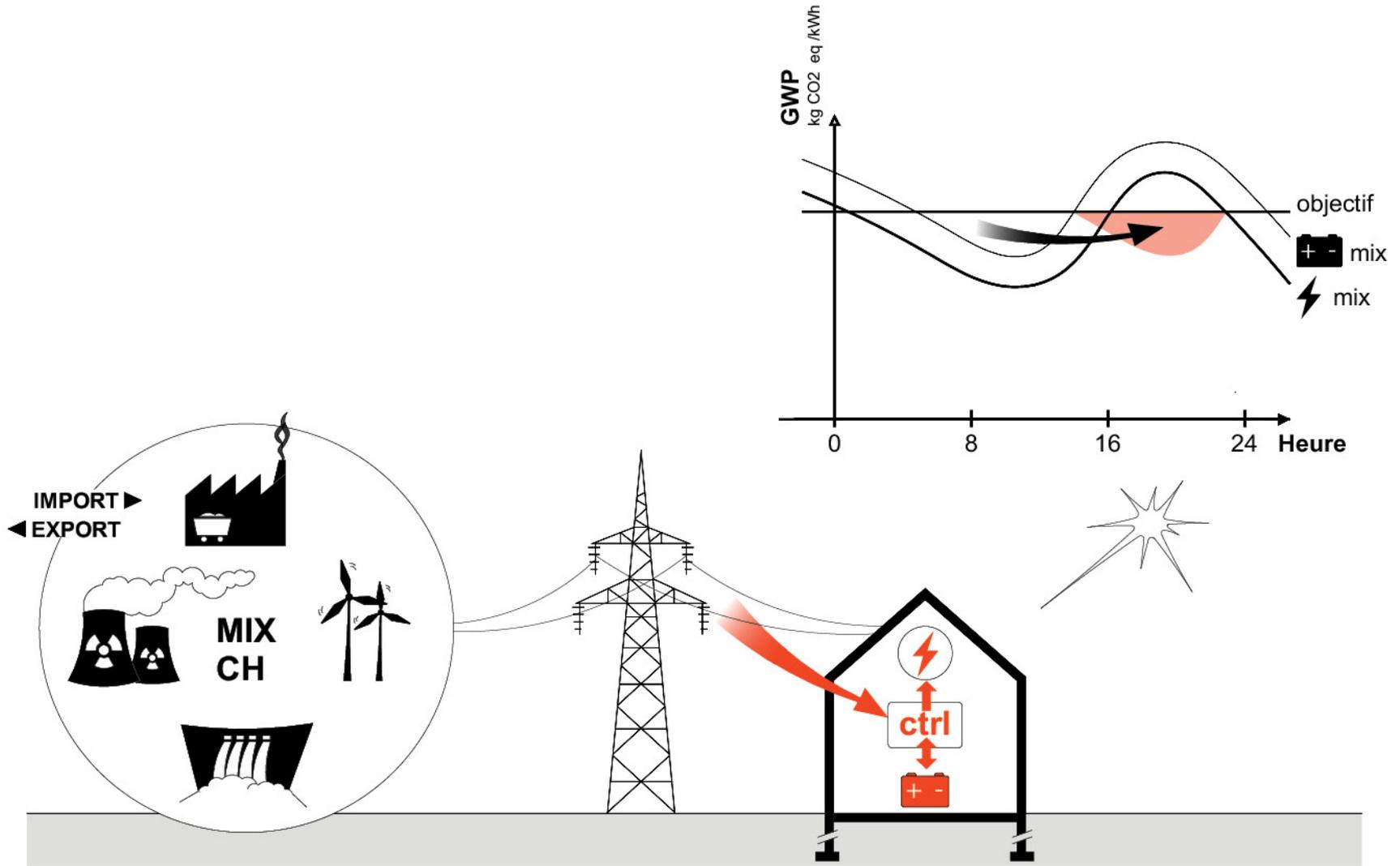
# Stockage - Principe



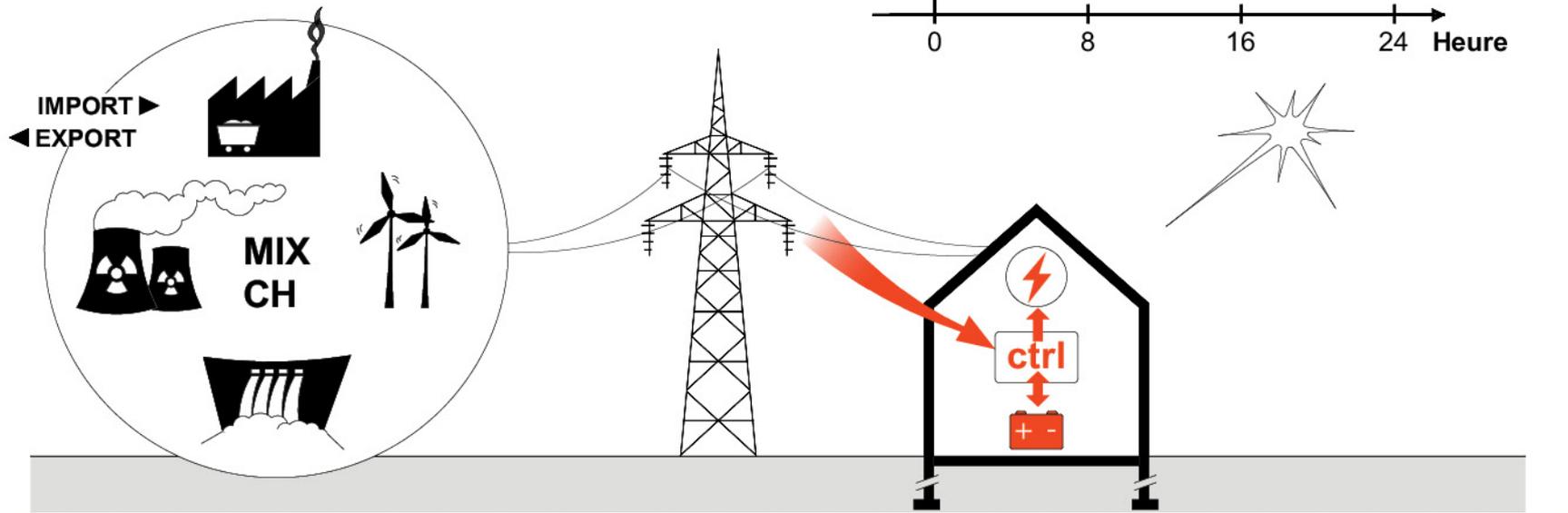
# Stockage - Principe



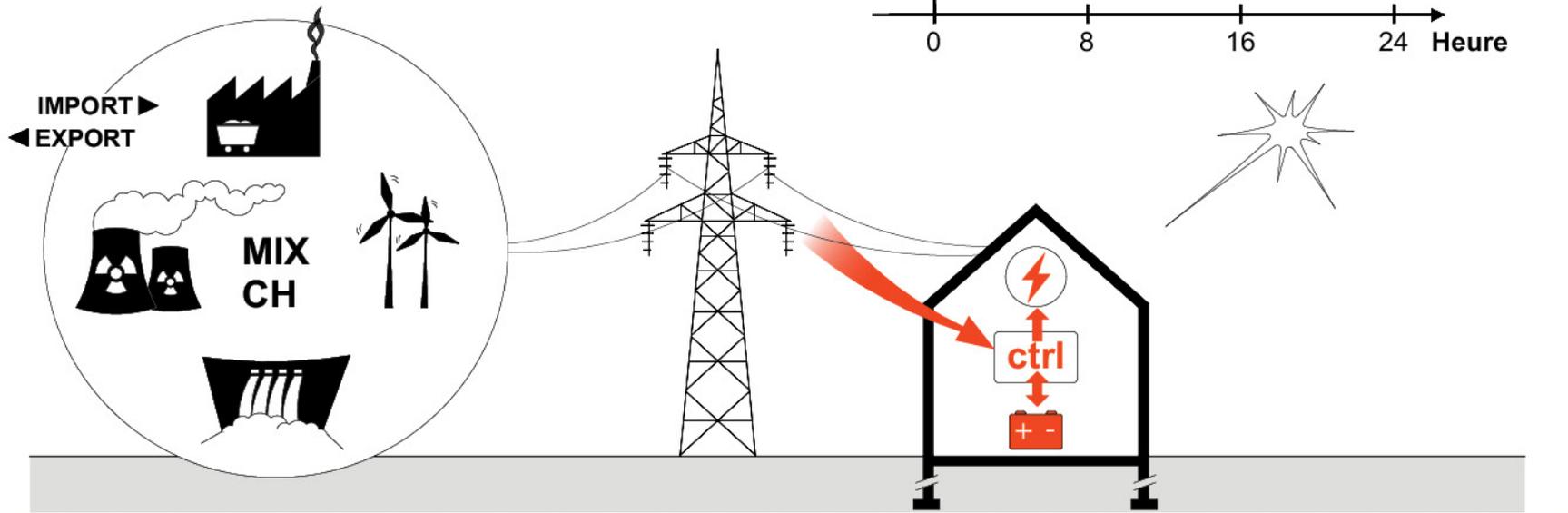
# Stockage - Principe



# Stockage - Principe



# Stockage - Principe



# Stockage - Systèmes

<b>Système:</b>	<b>Type d'énergie</b>	<b>Densité d'énergie (kWh/m<sup>3</sup>)</b>
Mécanique	Energie potentiel (hydro-pompe)	1
	Energie cinétique (volant d'inertie)	10
Electrique	Champs électrostatique (Condensateur)	10
	Champs électromagnétique (bobine)	10
Electrochimique	Batterie plomb-acide	100
	Batterie lithium-ion	500
Thermique	Chaleur sensible	116
	Chaleur latente	636
Chimique	Hydrogène liquide	2400
	Hydrocarbure	8500

(Fuchs et al., 2012)

# Stockage - Systèmes

## Stockage thermique

- sensible passif: inertie du bâtiment
- sensible actif: stockage d'énergie solaire journalier ou saisonnier
- latent passif: intégration d'élément de construction incorporant des PCM
- latent actif: stockage d'énergie solaire ou froid



## Stockage électrique

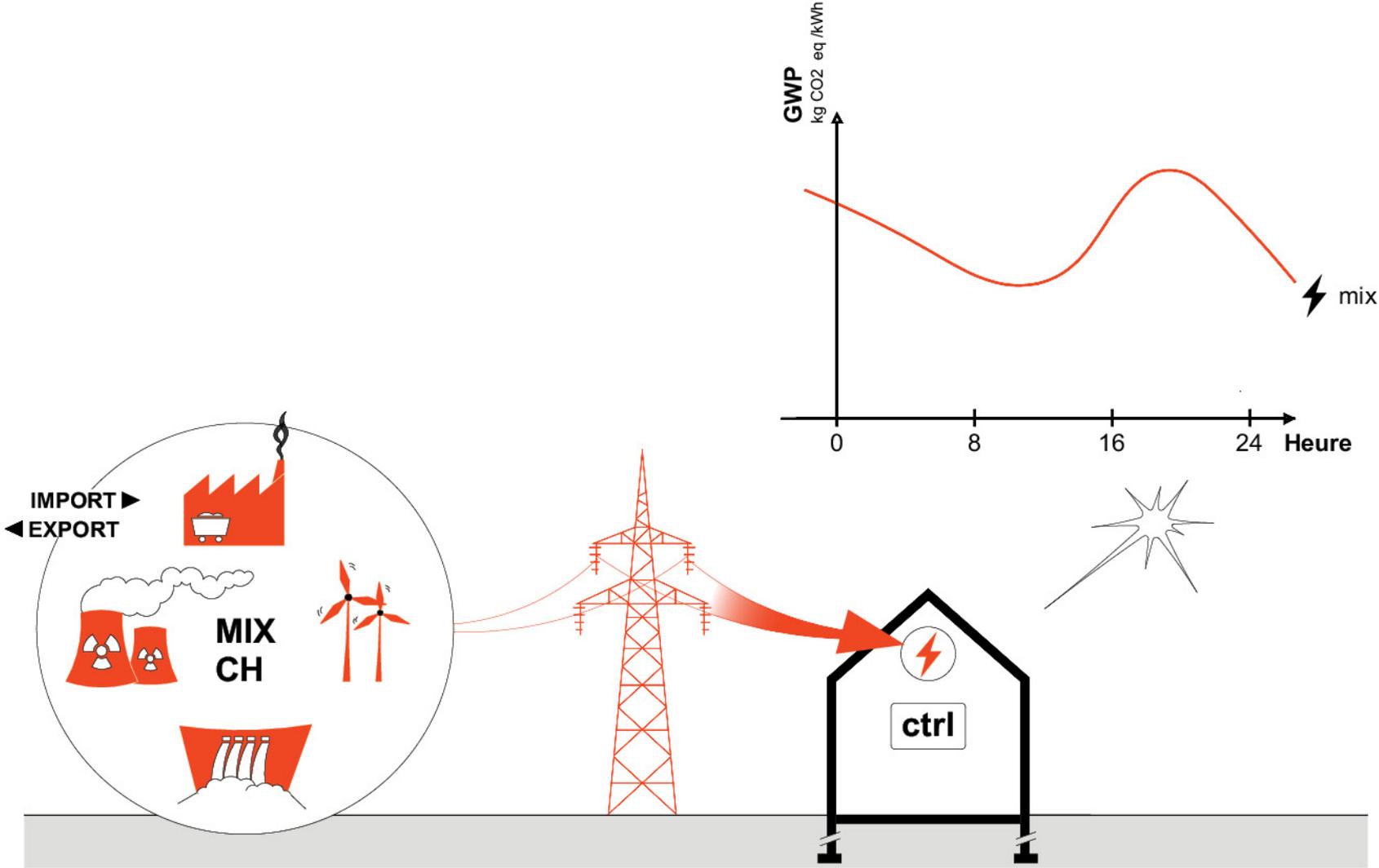
- Batterie électrique domestique
- Volant d'inertie



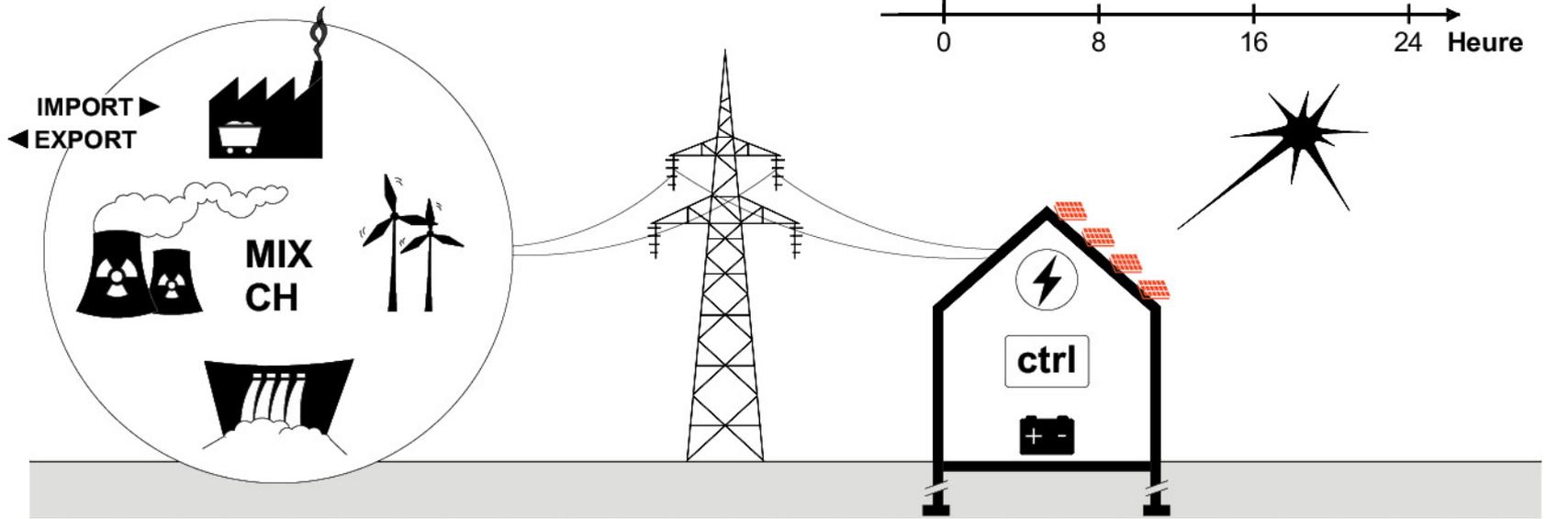
Ref. photos: Brique de construction en PCM, CelBlock, H+H Deutschland GmbH  
Stockage thermique saisonnier, Umwelt arena, Spreitenbach  
Batterie électrique pour habitation, Tesla Powerwall



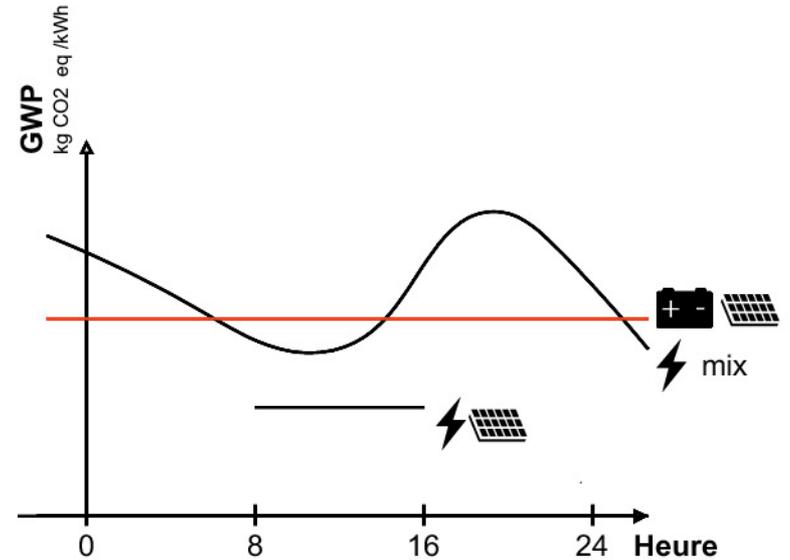
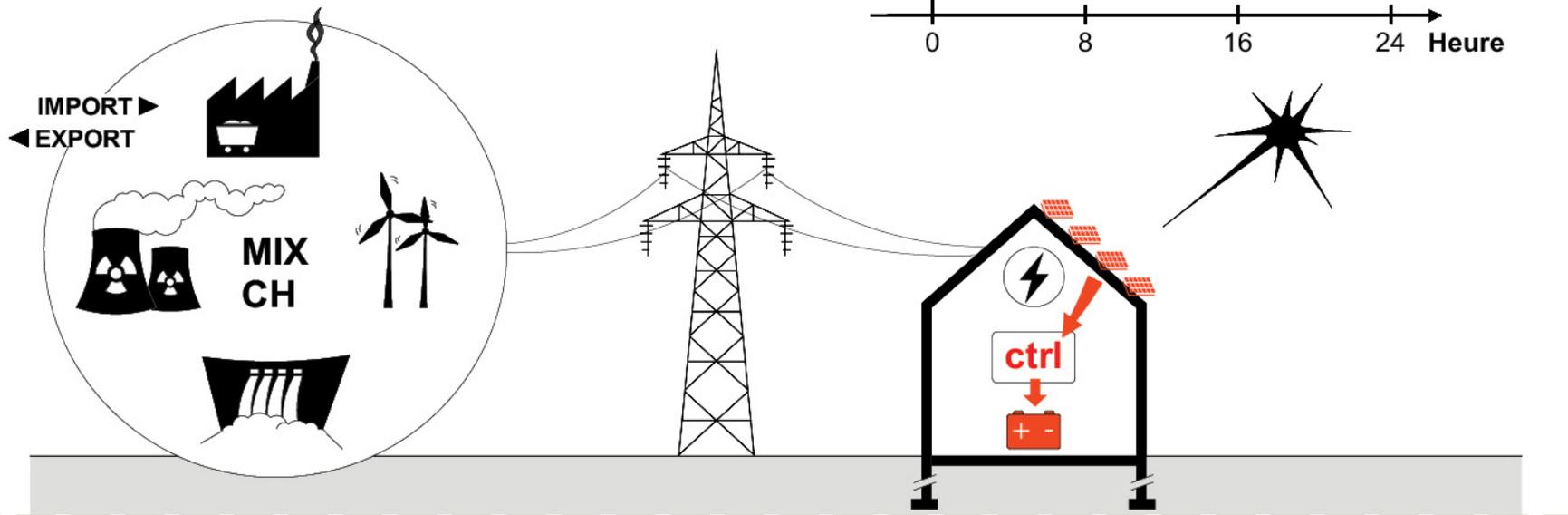
# Stockage – contenu dynamique



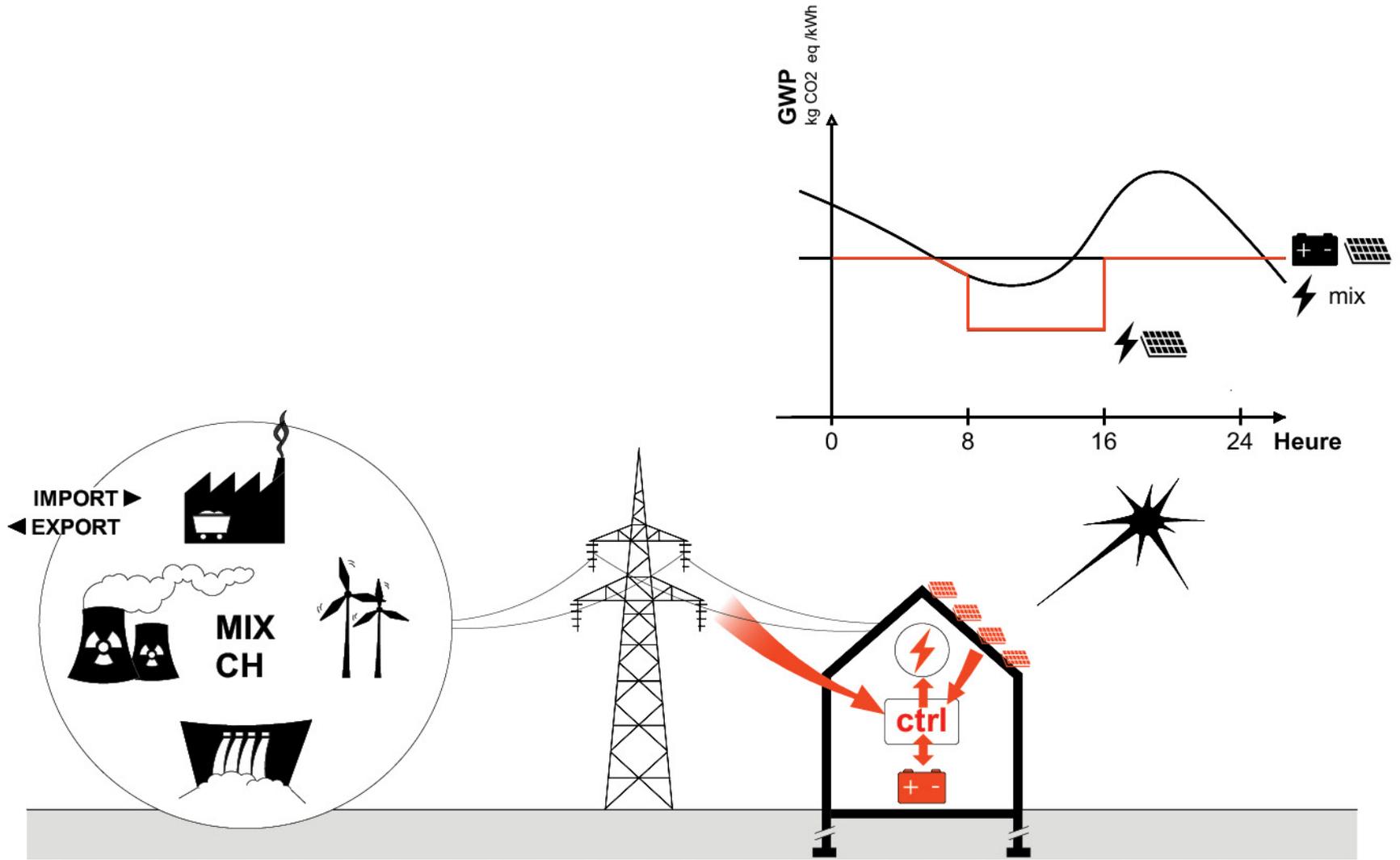
# Stockage – contenu dynamique



# Stockage – contenu dynamique

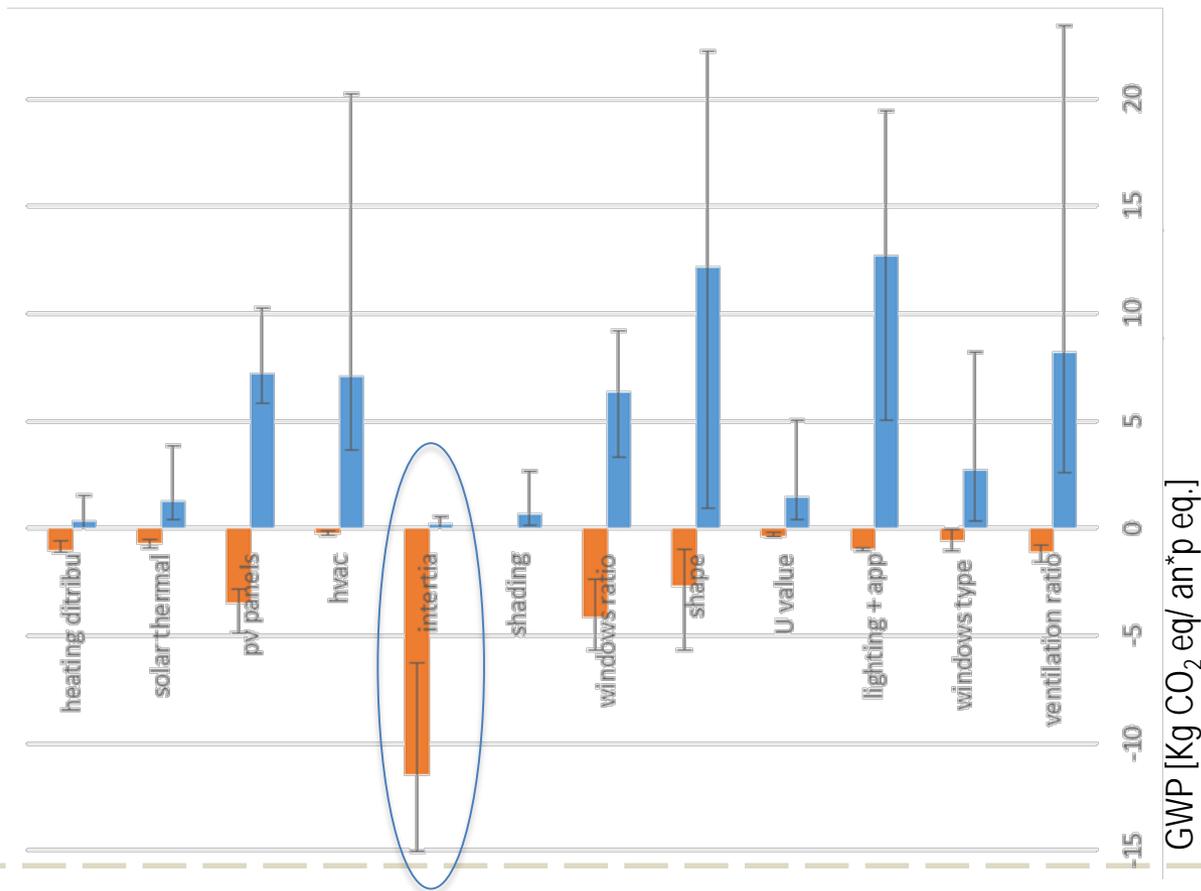


# Stockage – contenu dynamique



# Stockage – thermique passif

L'influence de l'inertie thermique a été analysée pour le cas du smart living lab. D'un point de vue carbone, le bilan est déficitaire si l'on utilise du béton.



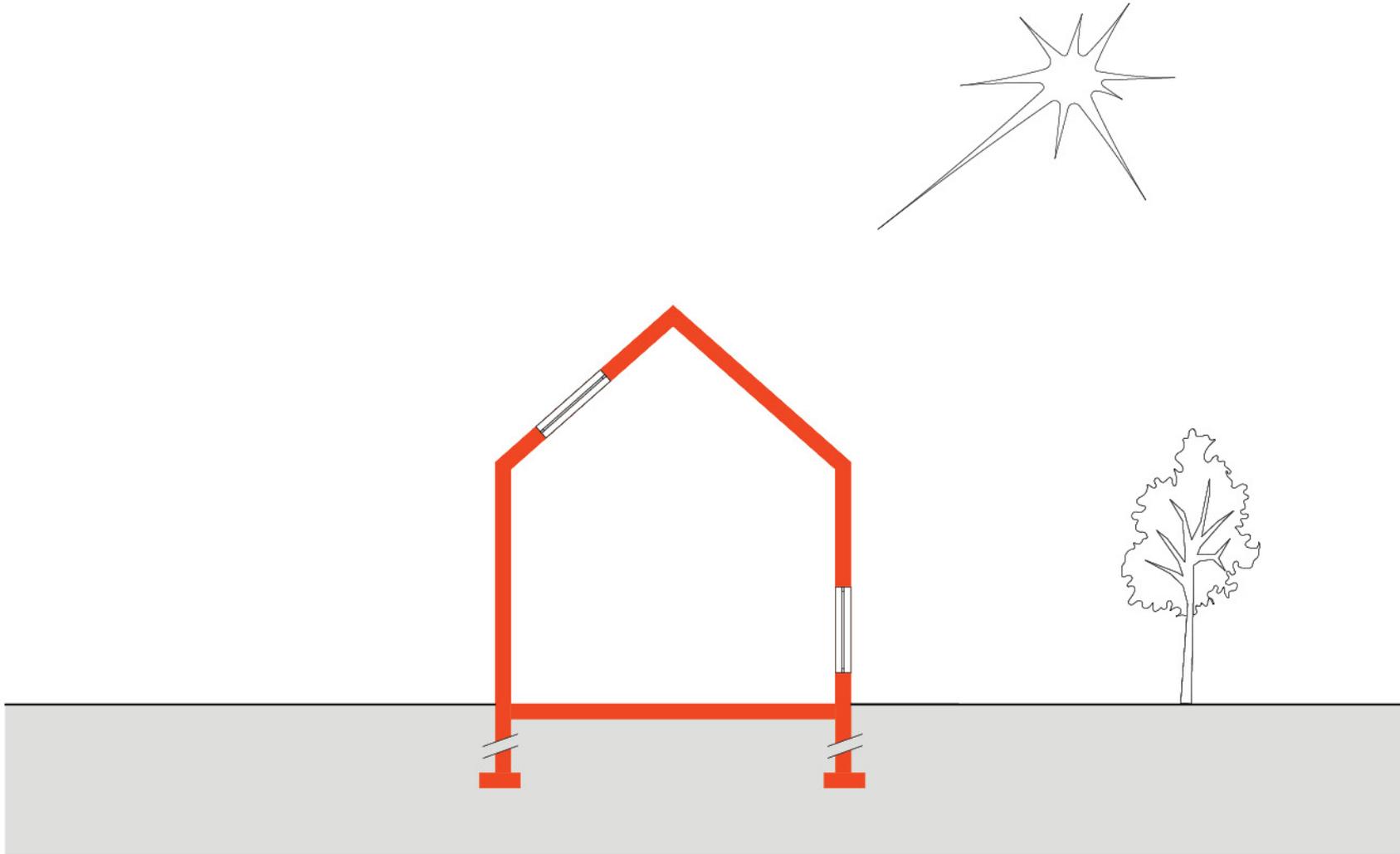
Impact opérationnel  
Impact intrinsèque

- Le stockage permet d'améliorer la **corrélation** entre production « d'énergie propre » et consommation.
- Son efficacité est d'autant plus grande que les **variations du contenu carbone** des différentes sources d'énergies sont importantes
- Le stockage peut être électrique, thermique, physique ou chimique.
- Son efficacité est d'autant plus grande **que son impact intrinsèque** est faible

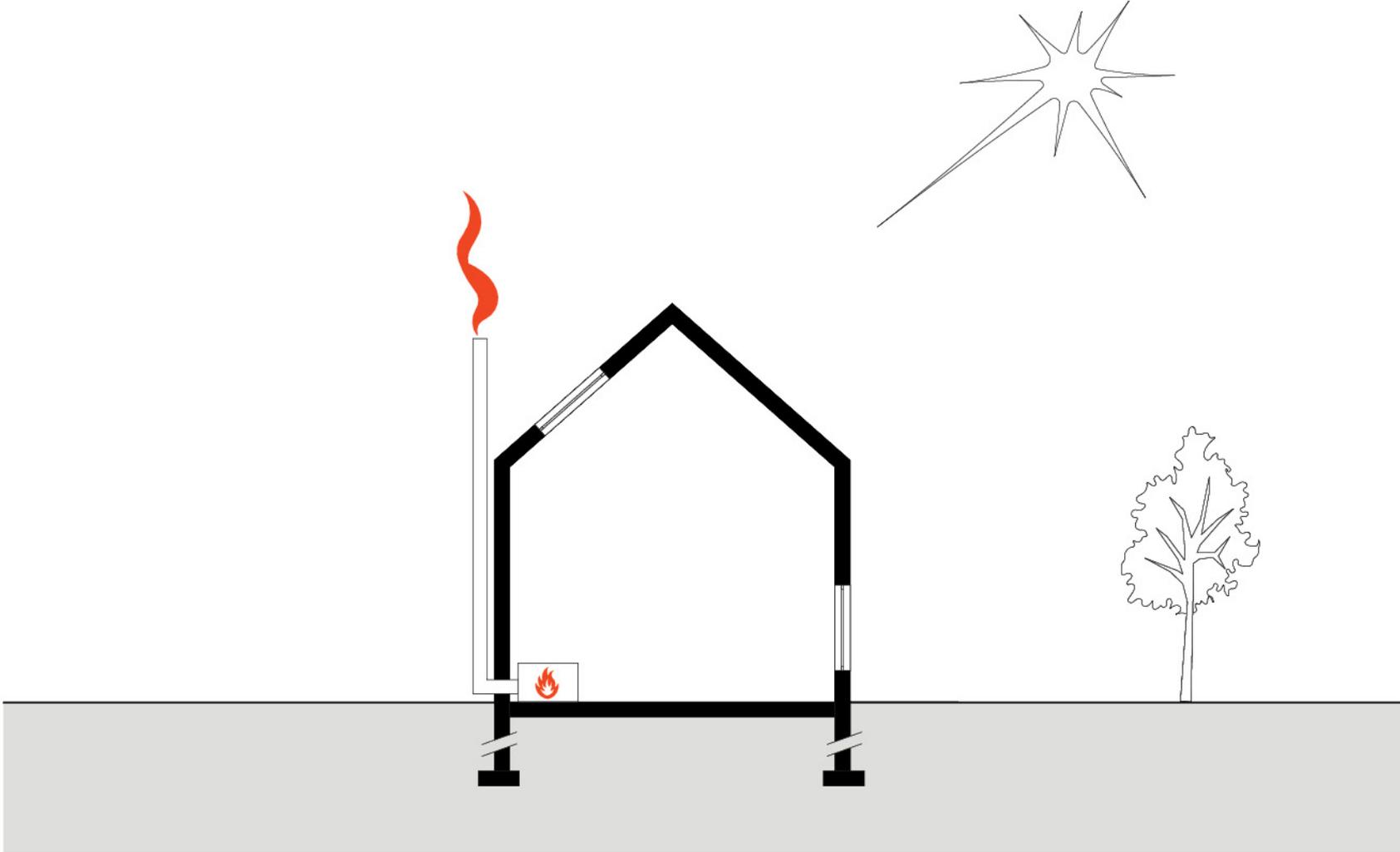


# Consommation d'énergie

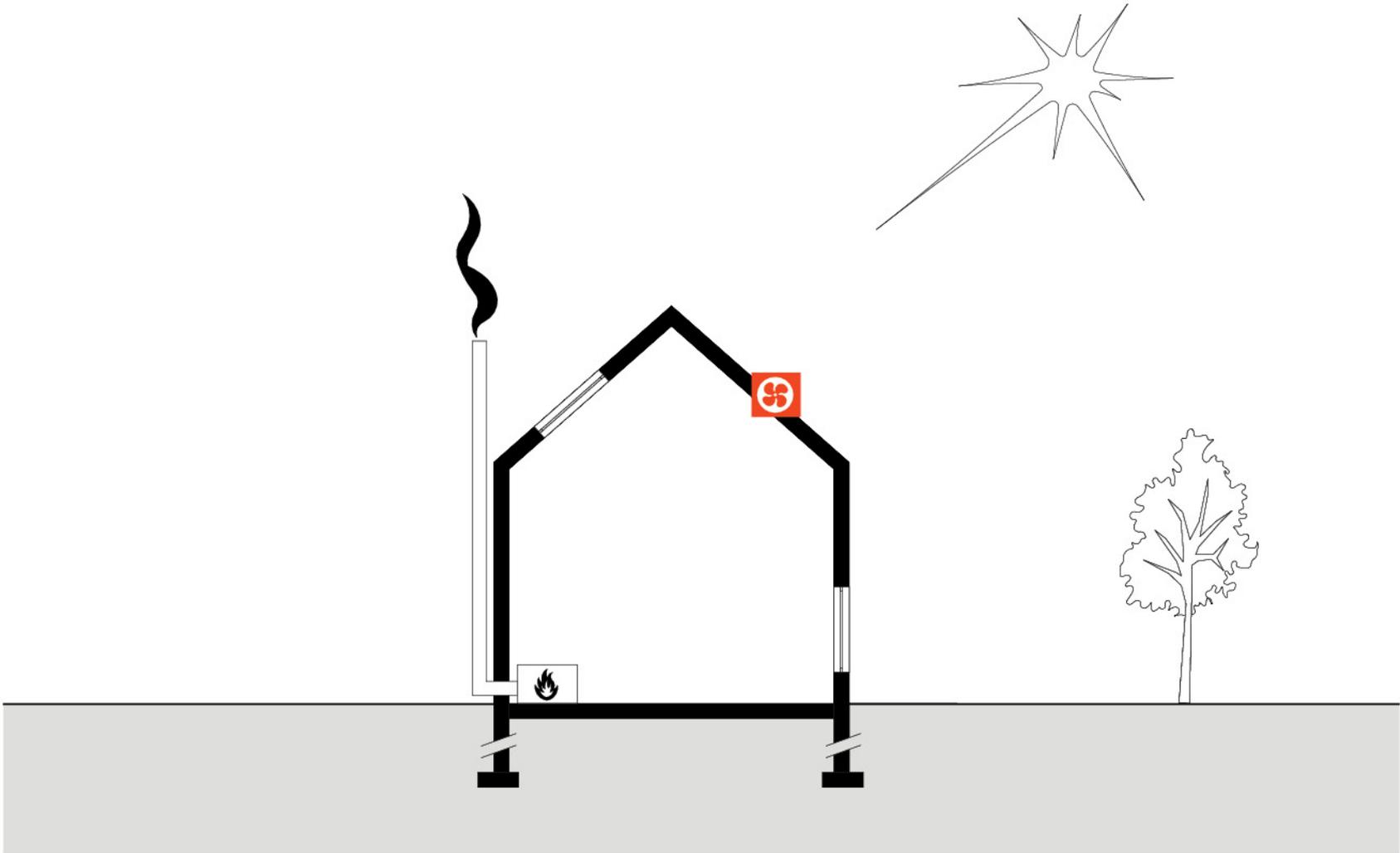
# Consommation – en détail



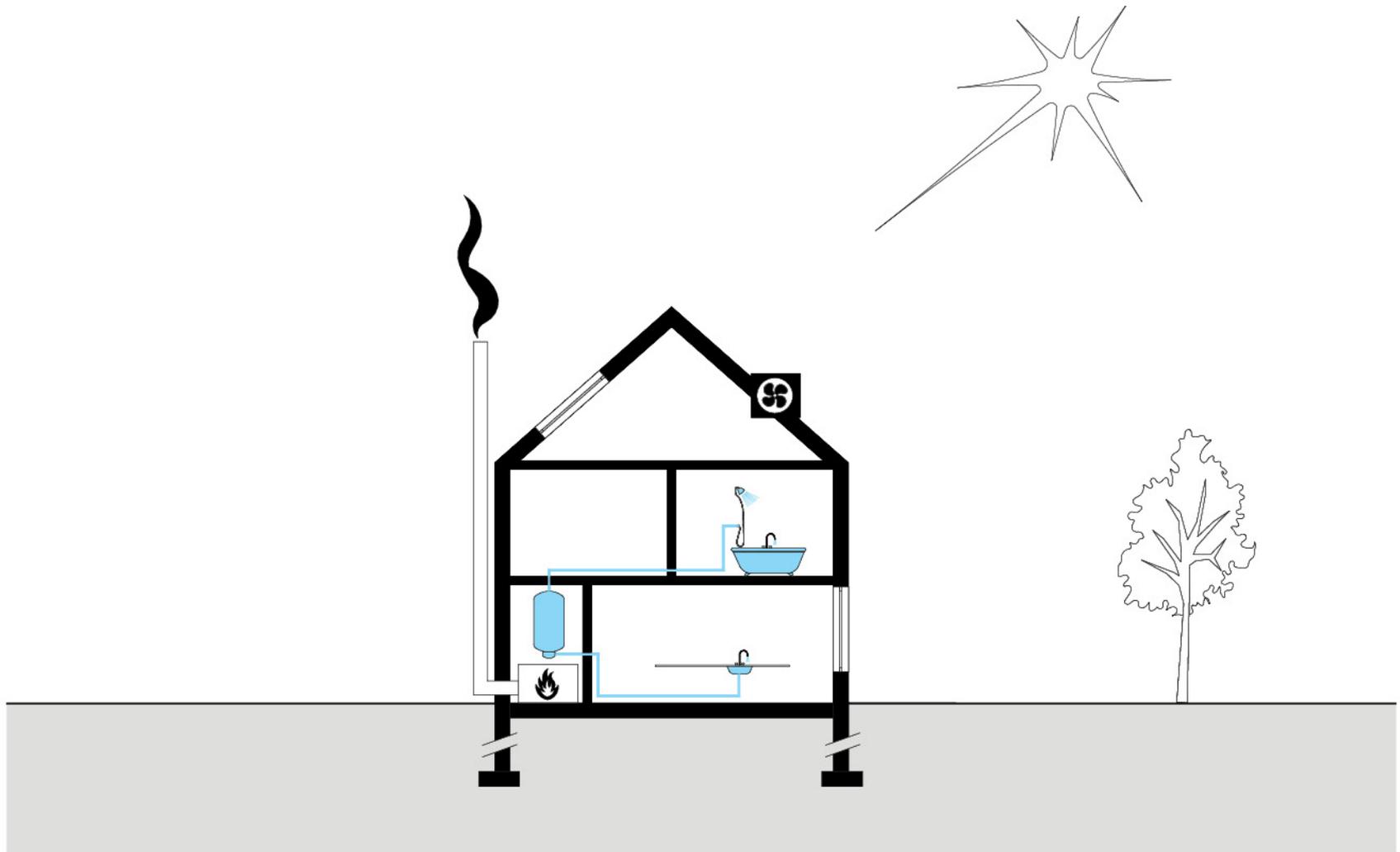
# Consommation – en détail



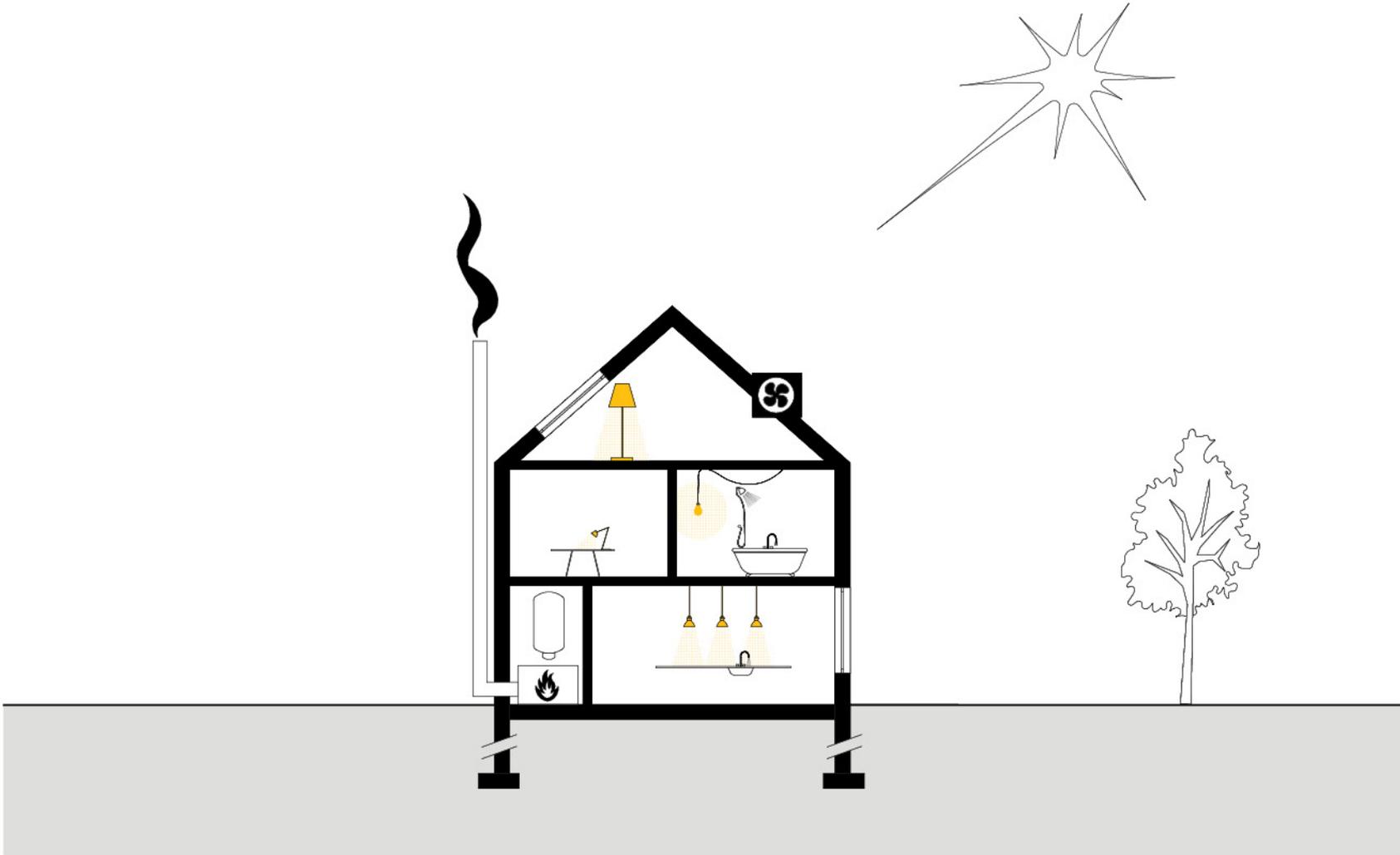
# Consommation – en détail



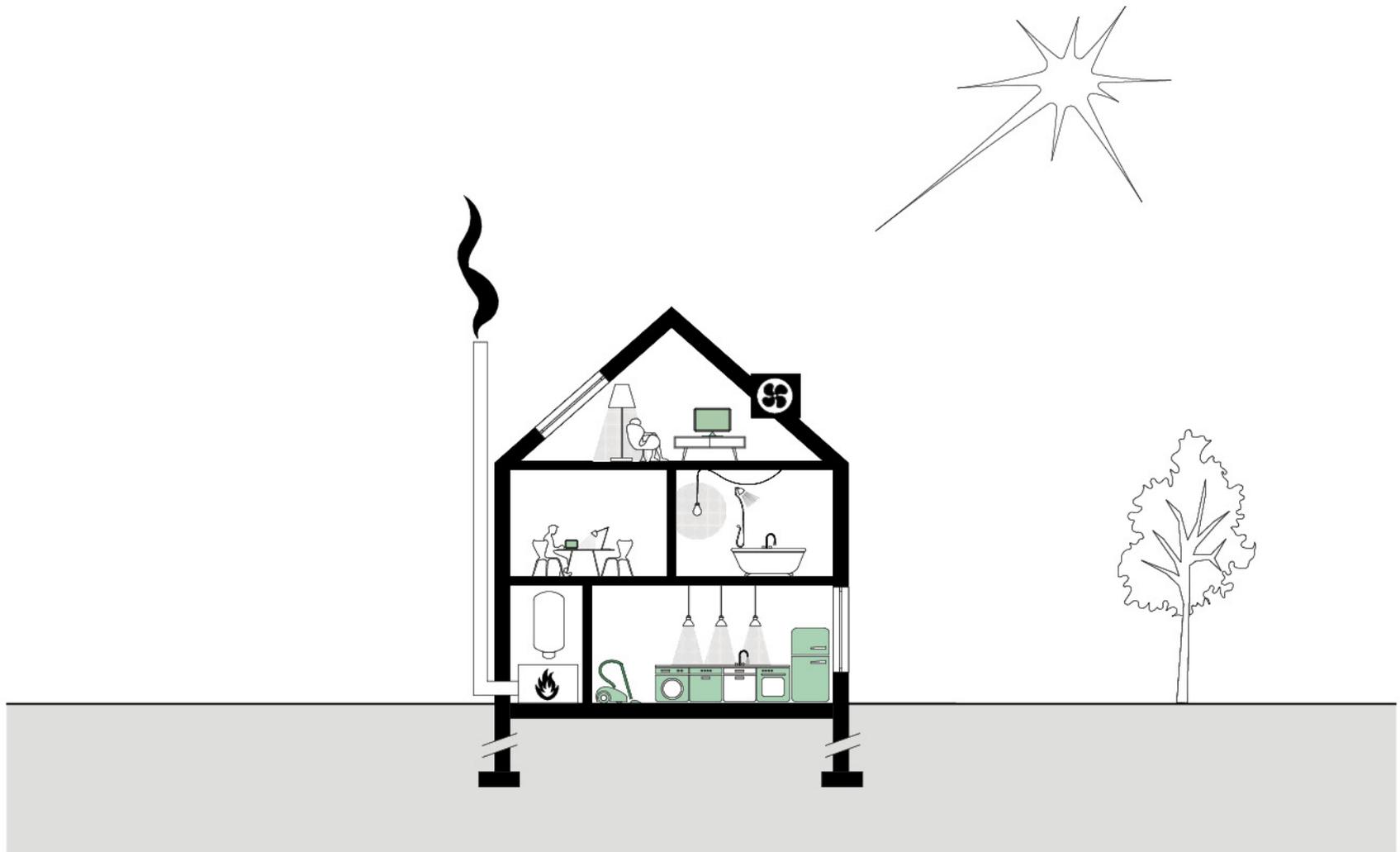
# Consommation – en détail



# Consommation – en détail

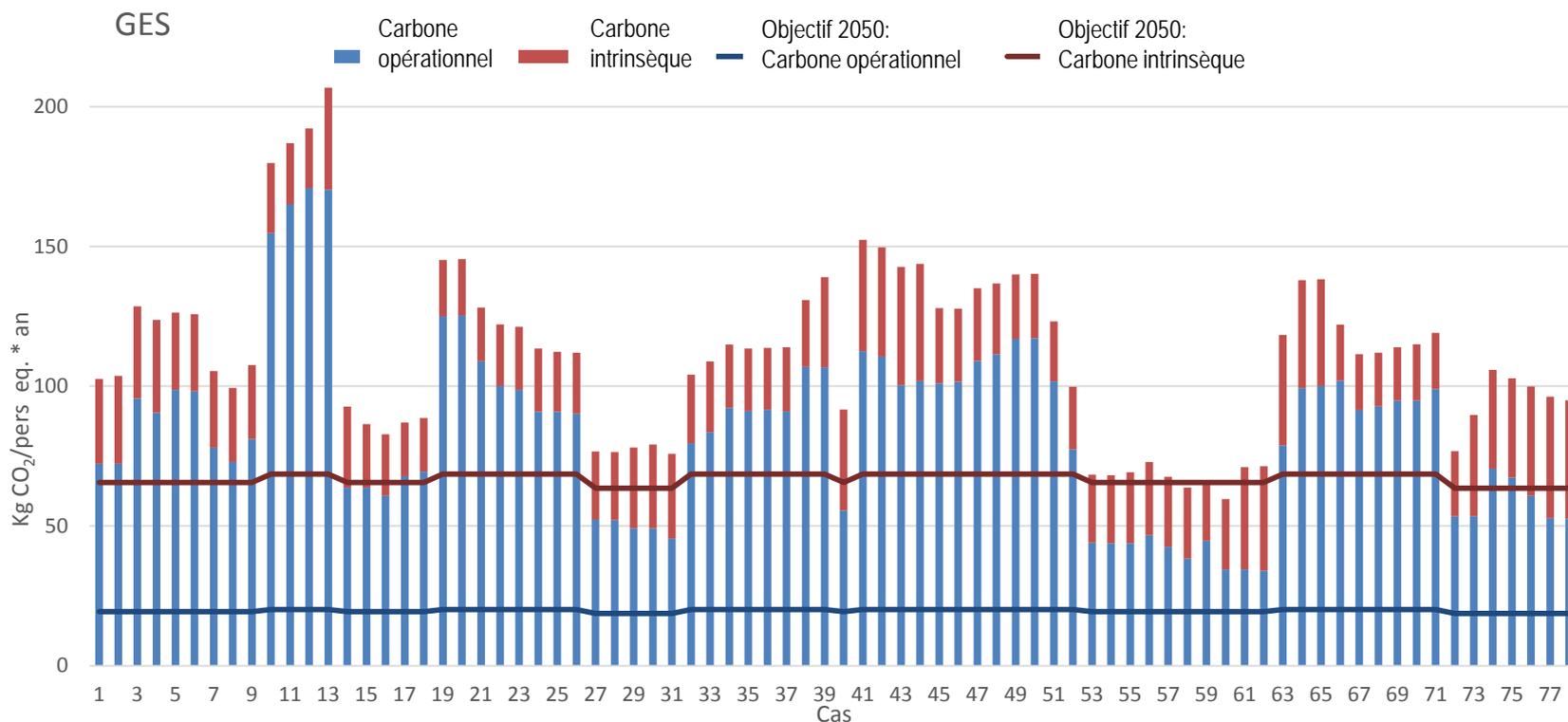


# Consommation – en détail



# Consommation – sensibilité

Une analyse de sensibilité nous renseigne que quelques cas seulement permettent d'atteindre les objectifs 2050.

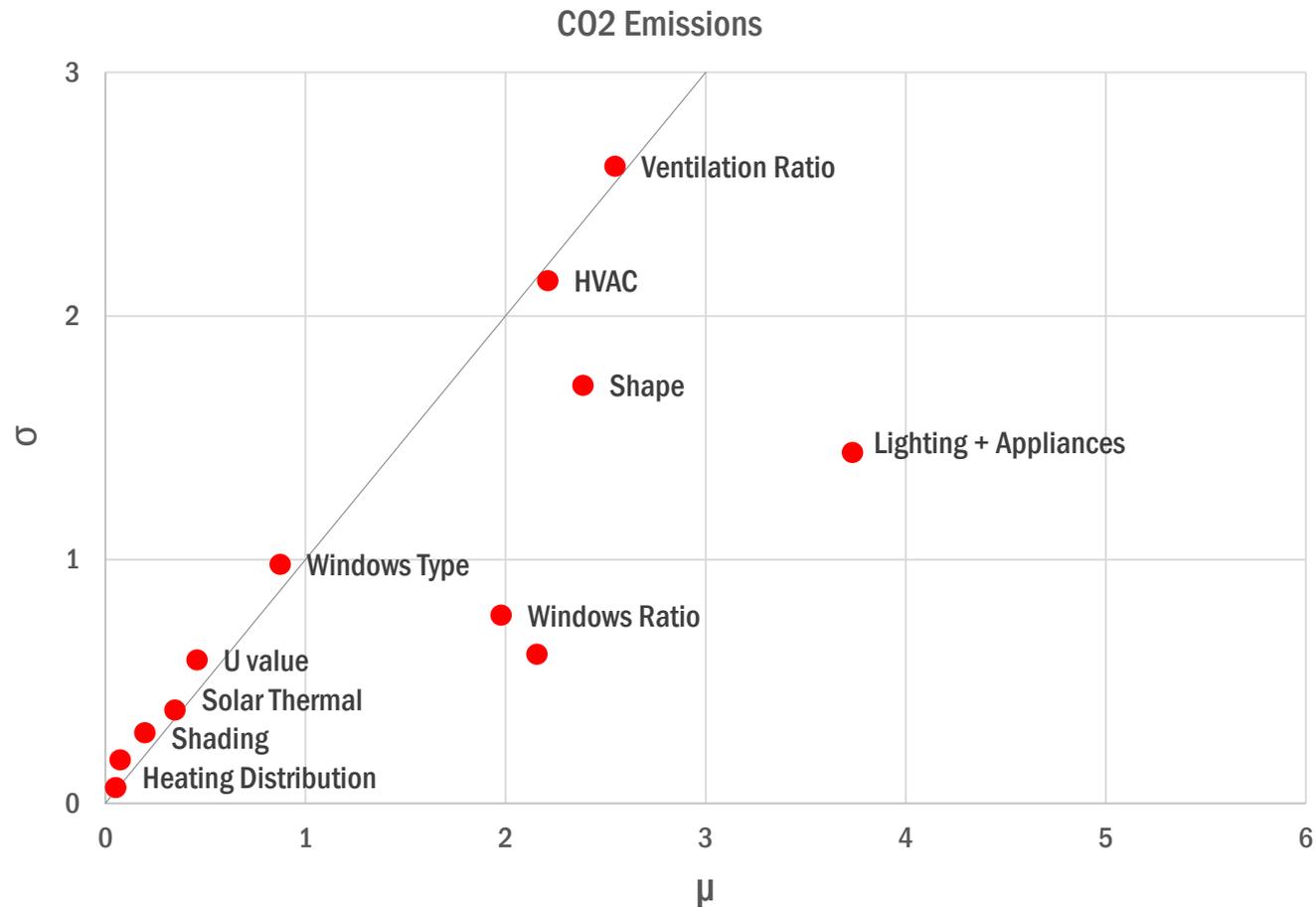


# Consommation – sensibilité

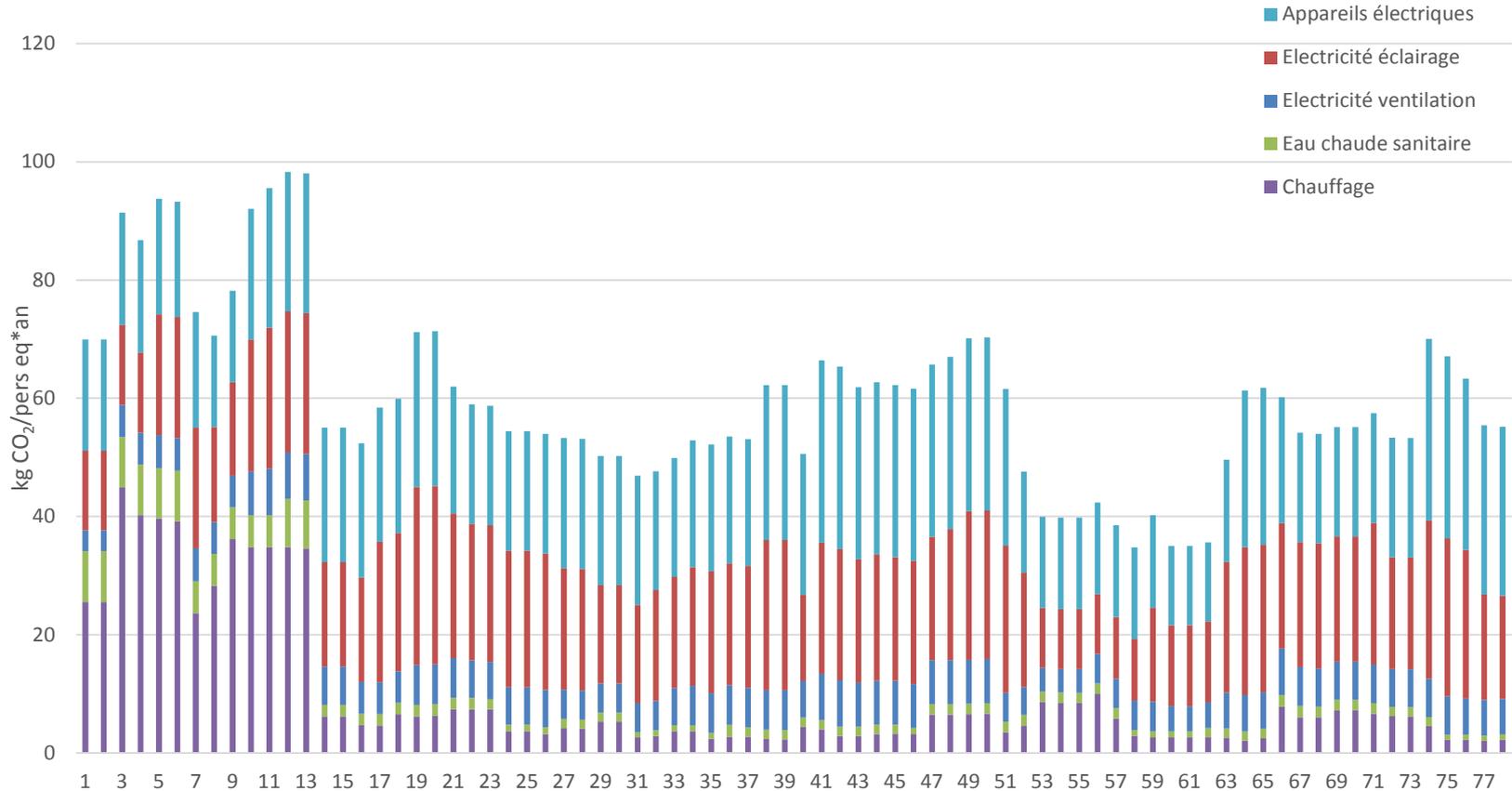
PARAMETER	INPUT			
SHAPE	1	2	3	-
WINDOW TO WALL RATIO	25%	50%	75%	-
U VALUE	0.1 W/m <sup>2</sup> K	0.15 W/m <sup>2</sup> K	0.20 W/m <sup>2</sup> K	0.25 W/m <sup>2</sup> K
WINDOW TYPE	U: 2.7 W/m <sup>2</sup> K g: 0.77	U: 1.3 W/m <sup>2</sup> K g: 0.64	U: 0.7 W/m <sup>2</sup> K g: 0.5	-
INERTIA	Light wall	Average	Massive wall	-
SHADING SYSTEM	20%	50%	70%	90%
VENTILATION RATIO	SIA	120% SIA	80% SIA	-
LIGHTING + APPLIANCES	Light SIA App SIA	Light SIA target App 73% SIA	Light Minergie App 82% SIA	Light SIA 2024 App 110% SIA
HVAC SYSTEM	Pellets	Natural gas	District heating	Heat pump
PHOTOVOLTAIC PANELS	None	30%	60%	100%
SOLAR COLLECTORS	None	20%	40%	60%
HEATING DISTRIBUTION	Radiators	Floor H.	Ceiling H.	Air H.

# Consommation – sensibilité

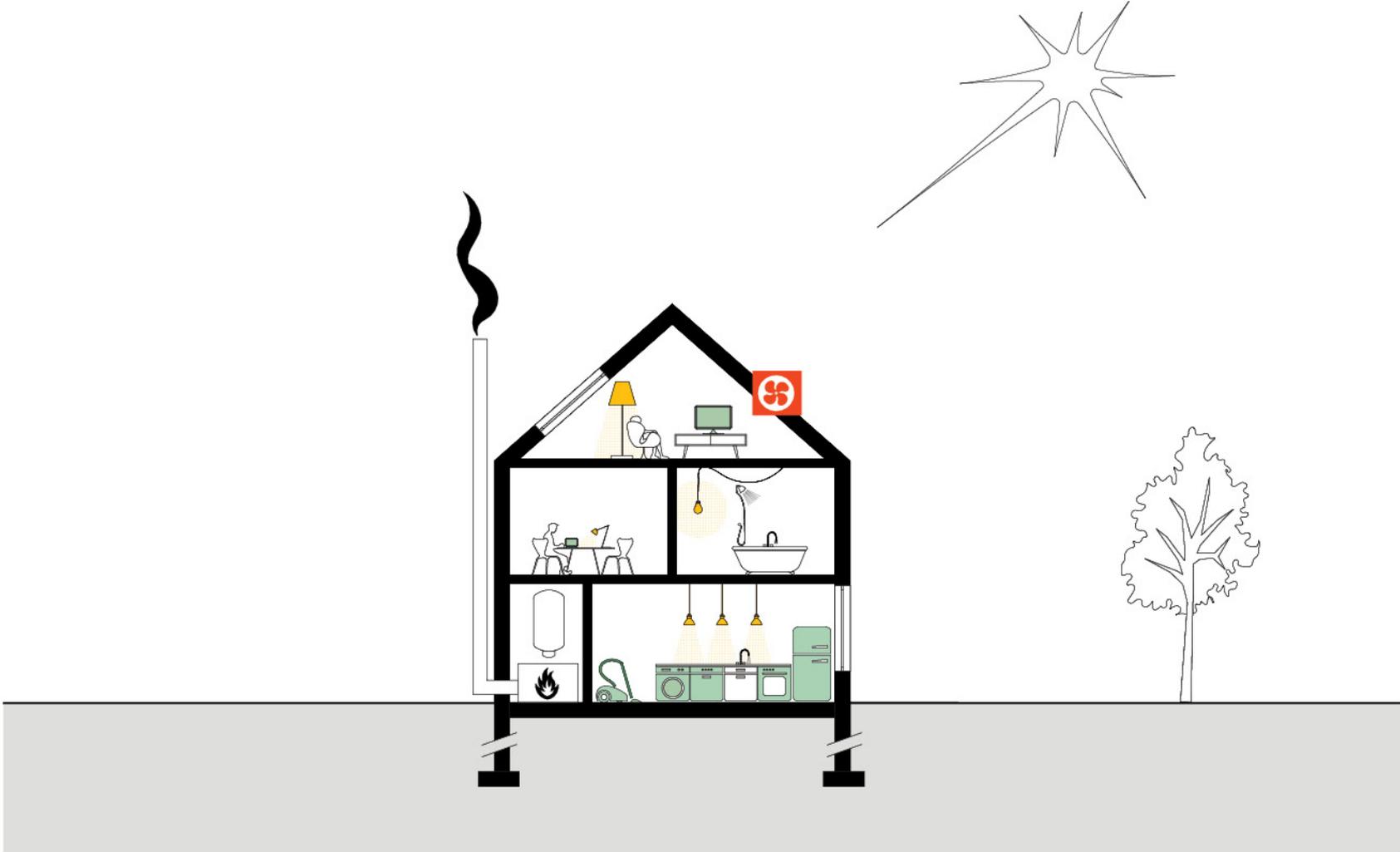
CO2 emissions	
Lighting + Appliances	3.7333
Ventilation Ratio	2.5467
Shape	2.3867
HVAC	2.21
PV panels	2.1567
Windows Ratio	1.9767
Windows Type	0.8733
Thermal Transmittance	0.4567
Solar Thermal	0.3467
Shading	0.1967
Heating Distribution	0.0733
Inertia	0.05



Les principaux contributeurs au changement climatique sont la ventilation, l'éclairage et les appareils électriques



# Consommation – en détail

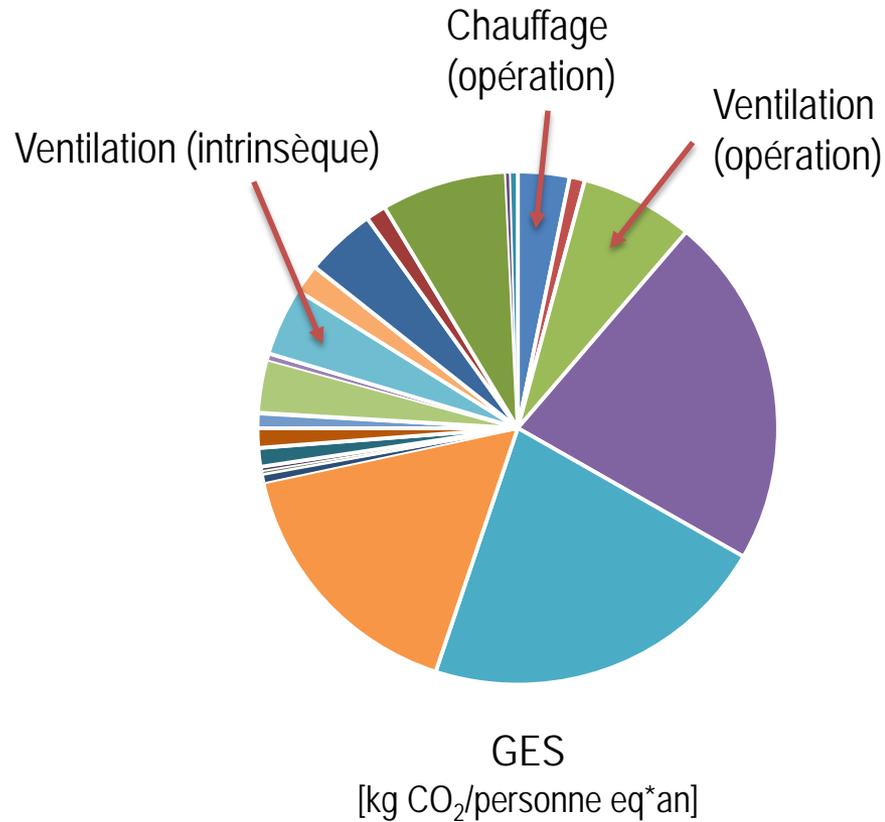


# Consommation - Ventilation



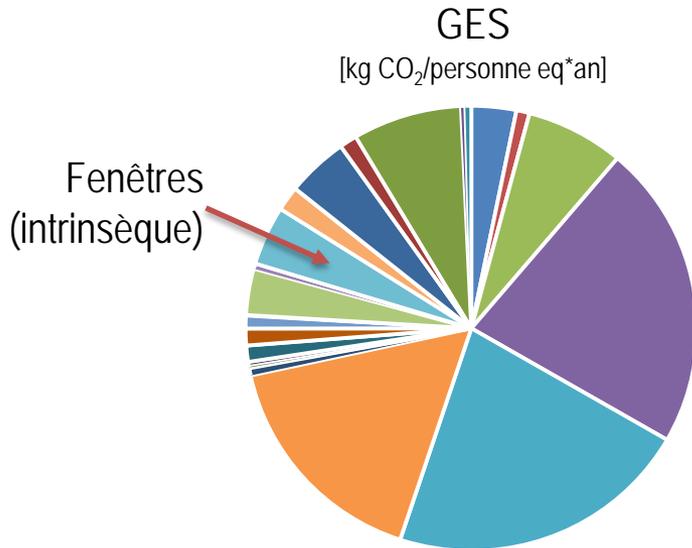
Est-ce que la  
*Ventilation naturelle*  
est la solution ?

# Consommation - Ventilation



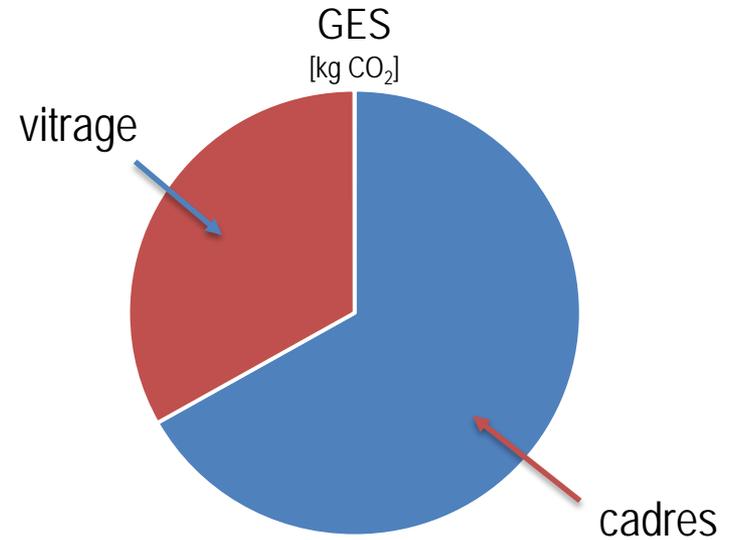
En fonction de la performance du système de chauffage, la ventilation mécanique n'est pas forcément la plus intéressante.

*Cas n°60: Le plus performants au niveau du GWP avec nos connaissances actuels de la construction*



Cas n°60: Le plus performants au niveau du GWP avec nos connaissances actuels de la construction

Impact des menuiseries sur un vitrage  
(25% cadre bois, 75 % double vitrage)

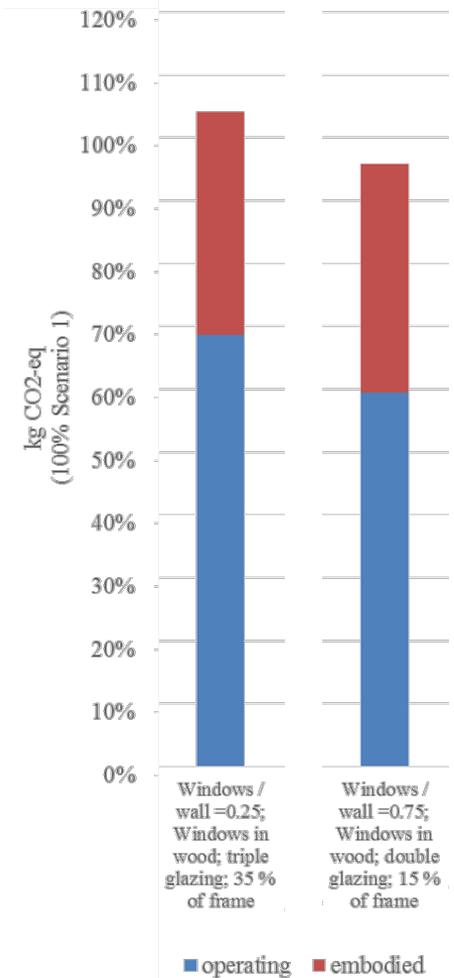


## Impacts intrinsèques

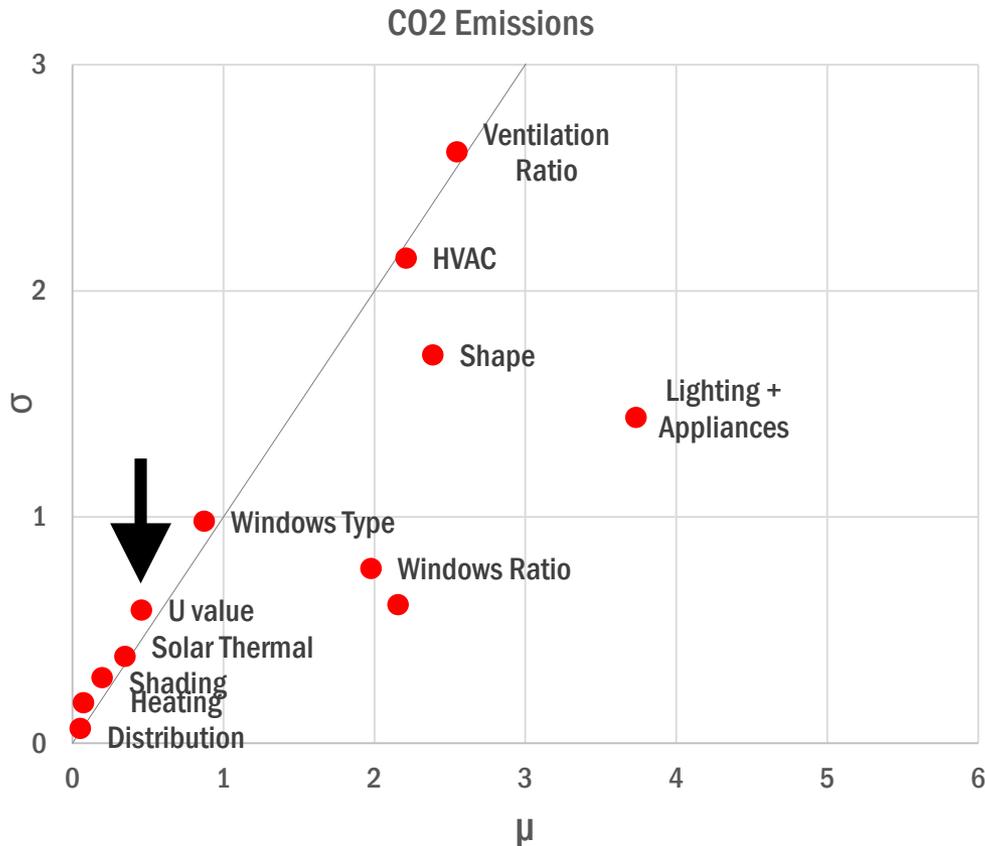
- Cadre bois: 144 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>
- Double vitrage: 32 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>

Comment développer la meilleure transparence en minimisant l'impact du cadre ?

# Consommation - Eclairage



# Consommation - Chauffage



L'impact intrinsèque de l'isolant est plus important que sa performance opérationnelle

Polystyrène expansé: 7.5 kg CO<sub>2</sub> /kg  
Fibres de cellulose: 0.3 kg CO<sub>2</sub> /kg

# Consommation - Chauffage

## Ouate de cellulose

## Polystyrène expansé

Mur extérieur 1,4%

Mur extérieur 17,9%

GES  
[kg CO<sub>2</sub>/personne eq\*an]

Cas n° 60: Le plus performants au niveau du GWP avec nos connaissances actuelles de la construction

- Les principaux contributeurs au changement climatique **évoluent en même temps** que la performance elle-même.
- Dans notre cas d'étude, **ventilation et éclairage** sont des contributeurs majeurs.
- Les solutions proposées pour limiter leur impact **diffèrent** des pratiques actuelles.
- Ces propositions issues d'un nouveau cadre de contraintes laissent présagées des **tendances de demain**.
- Ces tendances sont finalement plus intéressantes que les solutions proposées qui seront déjà **obsolètes** demain



smart  
**living**  
lab

## Conclusions

Les conclusions de ce programme sont en accord avec le contexte de l'étude (2050) et ne s'appliquent donc pas forcément à l'ingénierie du quotidien.

Sa plus grande valeur ajoutée réside dans le questionnement de nos méthodes de production du cadre bâti, car les réponses architecturales et techniques continueront d'évoluer en fonction de nos usages et de nos connaissances.

La seule certitude, c'est que l'on ne sait pas prédire le futur. Nos pratiques doivent donc constamment être questionnées et évoluer pour intégrer dans le **cahier des charges** d'un bâtiment :

- les éléments **d'innovation** nécessaires pour répondre aux nouveaux enjeux,
- les objectifs de **flexibilité** pour assurer un potentiel d'évolution constructive.