

Projet MOSIMA
Rapport - Rendu microscopique
Groupe A - 2025/26

Introduction

Ce rapport offre une explication détaillée de notre modèle microscopique pour la simulation de la société fictive issue du roman **Ecotopia**, appliquée sur la France de 2022. Le but de cette simulation est de pouvoir affirmer, ou non, ou sous quelles hypothèses une société Écotopienne puisse être viable dans un horizon de temps lointain, en France. Nous détaillerons précisément chacun des secteurs de l'Agriculture, de l'Énergie, de l'Écosystème, de la Population, du Transport et de l'Urbanisme.

Pour chacun de ces secteurs, nous ferons une brève présentation suivie de nos hypothèses de base. Ensuite, nous parlerons de notre choix d'implémentations, de notre modélisation et bien sûr des données recherchées en accord avec ceux du monde réel (et de la France de 2022). Et enfin, une partie résultat et analyse sera présente afin de vérifier la viabilité du modèle, et d'avoir une vision d'ensemble du résultat final.

Table des matières

Introduction	1
Table des matières	2
Bloc d'Agriculture	2
Introduction	2
Hypothèses	3
Modélisation	3
Données à prendre en compte	4
Bloc de l'Énergie	7
Introduction	7
Hypothèses	7
Modélisation	8
Données	12
Bloc de l'Écosystème	15
Introduction	15
Hypothèses	15
Modélisation	15
Données à prendre en compte	17
Bloc Population	19
Introduction	19
Hypothèses	19
Modélisation	19
Données	20
Bloc Transport	22
Introduction	22
Modélisation	22
Hypothèses / Simplifications supplémentaires	30
Bloc Urbanisme	32
1. Introduction	32
2. Architecture et entités	32
3. Dynamique du modèle Urbanisme (à chaque tick)	33
4. Paramètres et cohérence des valeurs	36
5. Indicateurs produits	36
6. Limites et perspectives	37
Sources et données utilisées	38
Répartition du travail	39
Annexe	40
Déplacements population	47

Bloc d'Agriculture

Introduction

Le bloc Agriculture la production de nourriture (viande et légumes) et de coton. Son but est donc de produire suffisamment de nourriture de sorte à respecter la demande de la population, mais également de produire la quantité de coton nécessaire à la fabrication de plastique pour concevoir les logements des résidents, ainsi que les constructions d'autres infrastructures. Le secteur de l'alimentation est essentiel dans cette société car sans elle, la population mourrait de faim et les autres secteurs ne seraient plus en mesure de répondre à la demande par manque de construction.

Hypothèses

Etant donné la complexité qu'est de modéliser le système français, nous avons dû formuler quelques hypothèses, nous supposons donc que :

- un tick représente un mois
- on néglige pour le moment les emplacements de chaque structure
- certaines données étant difficiles à trouver, nous avons souvent dû faire des approximations et des hypothèses au sein de celles-ci
- nous ne faisons pas de différence selon si l'élevage est intensif ou en plein air
- nous négligeons la nourriture à donner aux animaux d'élevage
- la chasse ne consomme aucune ressource

Modélisation

Chasse

Les animaux destinés à la chasse sont modélisés dans le bloc Ecosystème. C'est donc à ce bloc que Agriculture adresse sa demande (ie. le nombre d'animaux nécessaires pour produire une certaine quantité de kg de viande), via la fonction hunting(). Au sein de cette dernière, une commande ask appelle la fonction hunted_request() définie du côté de l'Ecosystème, et qui renvoie le nombre d'animaux ainsi chassés. À partir de ce nombre, nous calculons le nombre total de kg de viande obtenu par la chasse par une simple multiplication. Comme les espèces chassées présentent des poids très différents, nous avons retenu une valeur moyenne réaliste (soit 25kg) pour le nombre de kg de viande apportés par animal chassé. Enfin, la quantité de kg de viande chassée est soustraite de la quantité totale de viande à produire, ce qui permet de déterminer la part devant être assurée par l'élevage. La proportion entre viande issue de la chasse et viande issue de l'élevage est contrôlée par le paramètre hunting_over_farm, que nous avons fixé à 0.6. Cette valeur nous permet de nous rapprocher du fonctionnement du modèle écotopien, dont la production de viande provient exclusivement de la chasse.

Pertes alimentaires et engrais

Nous avons voulu rendre notre système plus réaliste que lors de la partie macro, c'est pourquoi nous avons intégré un système de pesticides avec des baisses de rendement de 35%. Nous avons aussi simulé l'impact des saisons sur la production avec des pourcentages de rendement associés.

Cependant, étant donné que tous ces facteurs influent assez négativement sur la production, nous avons créé de l'engrais à partir de toutes ces pertes durant la production de coton et légumes, ainsi que grâce aux déchets provenant des animaux d'élevages. Après fermentation durant 4 mois, la quantité d'engrais est disponible pour l'appliquer sur les terres à cultiver, et améliore ainsi le rendement de nos cultures.

Pénuries

Dans le cas des pénuries, nous avons conçu un système de stockage et de surproduction se basant sur les saisons. En effet, pour prévenir les pertes massives, durant l'hiver notamment, nous appliquons un facteur de surproduction durant les saisons plus favorables comme le printemps ou l'automne. Ainsi, on peut maximiser notre rendement en limitant le nombre de ressources nécessaires en haute saison, tandis qu'en basse saison on utilise un facteur important sur la consommation du stockage. Ce système a pour but de limiter le besoin de production de culture et donc de ressources consommées accumulées auprès des autres secteurs, pour au final obtenir un rendement peu intéressant.

Dans le cas où nous ne pourrions pas produire la quantité de ressources nécessaire, nous envoyons au secteur ayant fait la requête, ce que nous avons pu produire. Pour évaluer ce que nous pouvons produire, nous itérons sur l'ensemble des ressources nécessaires, et nous recalculons notre capacité de production maximale. Malheureusement, les quantités de ressources préalablement allouées pour notre demande initiale seront alors perdues.

Cependant, malgré ce système de prévention de pénurie, nous devons tout de même faire face à des contraintes liées aux quantités d'eau et d'énergie. En effet, comme nous produisons désormais du coton pour d'autres secteurs en plus d'urbanisme, nous pouvons vite atteindre des quantités élevées de demande, et comme il s'agit d'une ressource très demandante en eau, on peut facilement atteindre une pénurie. Dans le cas de l'électricité, étant donné que c'est utilisé par tous les secteurs, il est aussi normal d'avoir des pénuries à ce niveau là.

Pour contrer ce problème, nous avions également pensé à instaurer un système de priorité accordé à chaque ressource, privilégiant la production de nourriture, tout en gardant quand même un certain coefficient minimal pour le coton. Nous avions aussi pensé qu'à un certain niveau de déficit de ressources, nous pourrions modifier le régime alimentaire de la population en fournissant plus de légumes que de viandes potentiellement, mais par manque de temps nous n'avons pas pu.

Etant donné que nous devons produire assez de nourriture pour une population de la taille de celle française sans utiliser le moindre pesticide, ni importation, ni serre, nous devons consommer beaucoup plus de ressources que la France. De plus, nous créons du coton pour les infrastructures d'Ecotopie, ainsi nous recevons des demandes à la fois côté urbanisme, transport et énergie, ce qui a pour effet de fortement augmenter notre production et donc les quantités de ressources utilisées. Même si nous avons essayé de limiter l'impact négatif de tous ces éléments grâce à l'engrais par le recyclage, et la chasse, cela ne reste pas suffisant pour éviter les pénuries.

Interactions

Parmi les secteurs consommateurs, nous avons :

- le secteur Population qui calcule la quantité de légumes et de viandes dont ils ont besoin pour survivre. Nous leur transmettons soit la quantité demandée, soit la quantité maximale que nous pouvons.
- les secteurs Urbanisme, Transport et Energy qui demandent la production de coton dont ils ont besoin pour construire les nouvelles infrastructures. Ici aussi, nous leur donnons seulement la quantité que nous pouvons produire en cas de pénurie, et sinon la quantité demandée.

Parmi les secteurs producteurs, nous avons besoin :

- le secteur Ecosystem qui nous offre, si possible, la quantité nécessaire d'eau et de surface pour produire la quantité de production demandée.
- le secteur Transport nous permet de faire transiter nos quantités produites auprès des secteurs consommateurs.
- le secteur Energy nous prodigue la quantité d'électricité nécessaire pour subvenir à la production des légumes, viande et coton.

Données à prendre en compte

- Chasse : ~ 32 000 000 animaux chassés au total à l'année (intervalle 25 millions - 38 millions)
[25 à 38 millions d'animaux tués à la chasse chaque année - Animal Cross](#)
- Emissions gaz à effets de serre :
 Viande : 28 kg boeuf - 22,5 kg veau - 8.06 kg canard - 6.67 kg porc - 5.78 kg lapin - 4.56 kg poulet soit une moyenne de 12.6 kg de CO₂.
[Alimentation | Impact CO₂](#)
 Légumes (et fruits) : 1.55 kg avocat - 0.91 kg banane - 0.87 kg laitue - 0.71 kg pomme de terre - 0.64 kg potiron - 0.63 kg tomate - 0.61 kg poireau - 0.5 kg courgette - 0.41 kg pomme - 0.4 kg carotte soit une moyenne de ~ 0.7 kg de CO₂ (mais comme un peu engrais on retire 0.2).
[Alimentation | Impact CO₂](#)
 Coton : 16 kg de CO₂ (mais principalement à cause des engrais et des machines agricoles) mais comme beaucoup d'utilisation d'engrais ici alors qu'on n'en utilise pas encore, on peut supposer qu'on divise par deux cette valeur donc on garde 8.
[La belle empreinte, le guide vers les objets responsables](#)
- Production élevage :
 Eau : 15 415 litres boeuf - 5 988 litres porc - 4 325 litres poulet soit une moyenne de 8 576 litres
[Combien d'eau faut-il pour produire nos aliments ? - Actualité](#)
 Surface : 369.81 m² mouton et agneau par an soit ~ 30,8 m² par mois - 326.21 m² boeuf (troupeau viande) par an soit ~27.2 m² par mois - 43.24 m² boeuf (troupeau laitier) par an soit ~3.6 m² par mois - 17.36 m² porc par an soit 1.4 m² par mois - 12.22 m² volaille par an soit ~ 1m² par mois. Ce qui fait en moyenne 12.8m².
[Land use per kilogram of food product](#)
 Energie : Viande d'hamburger de 15 à 30 kWh (abattage, transformation, froid) on prend 10 kWh pour faire en sorte de considérer que l'abattage et que l'électricité (hors diesel, etc) ?
[\(PDF\) Energy Use in the Food Sector: A data survey](#)
- Production champ légumes (et fruits) :
 Eau : 822 litres pomme - 237 litres laitue - 214 litres tomate soit une moyenne d'environ 425 litres
[Combien d'eau faut-il pour produire nos aliments ? - Actualité](#)
 Surface : 21.5 t/ha soit 21 500 kg/ha soit 10 000 / 21 500 ~ 0.47 m² par kg
[BIL_FEL_Chiffres_cles_Fruits&Legumes_2023.pdf](#) (page 30)
 Energie : On suppose ici qu'une laitue représente tous nos légumes : Laitue en plein champ 1 kWh, ici l'énergie représente à la fois le diesel et l'électricité utiles pour la conception de la laitue, c'est pourquoi on va prendre la moitié de cette donnée donc 0.5 kWh.
[PDF Energy Use in the Food Sector: A data survey](#)
- Production champ coton :
 Eau : en moyenne 10 000 litres
[Tout savoir sur le coton - Entre 2 Rétros - E2R PARIS](#)
 Surface : 750 kg/ha = 0.075 kg/m² soit une surface de (1/0.075) ~ 13.3 m²
[COTON : Des conditions de production du coton très contrastées - Encyclopédie Universalis](#)
 Energie : 0.2 kWh
[untitled](#)
- Distance de transport : nous avons vu sur plusieurs sites que la distance entre les espaces d'agriculture et les mini-villes faisait quelques dizaines de kilomètres, souvent entre 20 à 80 km. Donc nous prenons la moyenne de cet intervalle pour simuler la distance à parcourir pour transmettre notre production, soit 50km.

- Saisons : nous nous sommes basés sur cet article pour évaluer des facteurs de saison raisonnables
[Agricultural production - crops - Statistics Explained - Eurostat](#)
- Pesticide :
35% de rendement en moins
[Pesticide productivity and food security. A review | Agronomy for Sustainable Development | Springer Nature Link](#)

Quantité de compost par parcelle : 3 kg d'engrais par m² max ->

<https://www.intradel.be/files/library/Jardin-Ressources-et-biocentre-GH/Jardin-peda/PDF-formations/Atelier-3-Le-compost-Engrais-et-amendements.pdf>

Amélioration des cultures : rendements améliorés de 20% à 50% - 30% pour du maïs -> sûrement prendre 30% d'amélioration du rendement des légumes

Quantité de fumier / déchets produits par les animaux :

[essd-2023-288.pdf](#)

Temps de transformation : 4 mois

Bloc de l'Énergie

Introduction

Le bloc **Énergie** est un pilier critique dans la réponse aux besoins du système Écotopien. En effet, il est nécessaire **d'alimenter la construction et l'usage quotidien des logements** (électroménagers...), les **transports**, le maintien de **l'agriculture**, tout ça à l'échelle de la France de 2022. Ecotopia, étant une société se voulant ancrée dans des termes écologiques, nous mettons une attention particulière à la production d'énergie renouvelable. On a donc créé une société 100% électrique.

Hypothèses

- Le pas de temps est mensuel.
- La consommation individuelle est modélisée par une moyenne résidentielle (2022), modulée par saisonnalité et bruit, puis bornée. Cette moyenne provient de la consommation annuelle résidentielle en 2022, tout type d'énergie confondu.
- Le mix énergétique cible est un objectif de long terme, que l'on choisit à l'initialisation.
- Les pertes réseau sont agrégées par un taux fixe (~7.9%).
- La disponibilité réelle des capacités dépend de la saisonnalité et d'aléas comme les pannes ou la sécheresse.
- Les infrastructures de réseau sont supposées déjà présentes.
- On ignore la phase de transition France / Ecotopia. On initialise directement un parc équivalent à la production 2022 toute énergie confondue (~1.25e12 kWh/an), réparti selon le mix choisi.

Modélisation

Agents

Nous utilisons en tout 7 agents :

- **Energy** est l'**agent bloc**, faisant l'interface avec le coordinateur. Il orchestre les ticks, collecte les résultats et pilote la consommation.
 - **energy_producer** est l'**agrégateur national**. Il répartit la demande selon le mix, et agrège ensuite la production, les émissions et les ressources consommées. Il pilote également la planification de construction éventuelle de nouvelles infrastructures à chaque fin de tick.
 - **sub_energy_producer_base (x4)** est le **gestionnaire de chaque type d'énergie** (nucléaire, solaire, éolien, hydro). On les appellera les filières. Il gère les sites, leurs cycles de vie, et leur production réelle.
 - **energy_consumer** applique la **consommation énergétique de chaque agent individu** (avec un facteur d'échelle)
-

Infrastructures

Chaque filière est représentée par des sites typiques :

- Le site **nucléaire** est représenté par un **réacteur nucléaire**.
- Le site **solaire** est représenté par un **parc solaire**.
- Le site **éolien** est représenté par un **parc éolien**.
- Le site **hydro** est représenté par une **centrale hydraulique**.

De plus, chaque site possède :

- Un statut : opérationnel / construction / maintenance.
- Un compteur de ticks restants avant (selon le statut) :
 - La fin de la construction
 - La prochaine maintenance
 - La fin de la maintenance

La capacité totale du sous-producteur est la somme des capacités unitaires de tous les sites, en prenant en compte que les sites opérationnels.

La partie "Données" ajoutera des précisions sur la capacité de kWh/mois des infrastructures, leur surface, leur consommation, etc.

Construction et maintenance

Nous modélisons le **cycle de vie des infrastructures au niveau du site**. Chaque filière possède **une liste de sites**, et chaque site est caractérisé par **un statut** (construction, opérationnel, maintenance) ainsi que par des **compteurs de temps restants** (ticks) pour chacune de ces phases. À la **fin de sa durée de vie**, un site ne disparaît pas, mais il **passe en maintenance longue** représentant une **réhabilitation parfois lourde**. Cette maintenance peut être plus longue que la construction initiale, comme c'est le cas avec les centrales nucléaires. Le modèle ne prend pas en compte la destruction pure des sites, car elles sont rares et concernent

presque que les énergies non-renouvelables. On ignore également les réductions brutales de la demande, par exemple à cause d'un choc démographique.

Deux indicateurs sont suivis en continu :

- **La capacité installée**, représentant la somme des capacités de tous les sites, quel que soit leur état.
- **La capacité disponible**, représentant la somme des capacités des sites opérationnels uniquement.

Les phases de **construction** et de **maintenance consomment des ressources à chaque tick** (eau et coton), ce qui traduit les besoins matériels des chantiers.

Lorsque la **capacité disponible devient insuffisante**, on déclenche la **construction** de nouveaux sites selon le déficit et le mix. On demande la **surface au sol** nécessaire (m²) à **Écosystème**.

=====

Stochasticité

La **stochasticité** est intégrée à deux niveaux complémentaires : la **demande** et la **disponibilité de l'offre**.

Pour la **demande**, la **consommation moyenne mensuelle est modulée par une saisonnalité sinusoïdale** (avec un pic hivernal) à laquelle s'ajoute un **bruit gaussien global**, puis un **bruit individuel par agent**, le tout étant **borné** afin d'éviter des fluctuations extrêmes et irréalistes.

En ce qui concerne la **production**, chaque filière est soumise à une **disponibilité saisonnière spécifique**. Cela veut dire que chacun d'entre eux aura sa propre amplitude et phase. Par exemple, l'énergie solaire est maximale en été, l'éolien en hiver, l'hydroélectricité est plus abondante en fin d'automne/début d'hiver... Cette modulation multiplie (positivement ou négativement) la capacité de chaque sous-producteur. On ajoute à cela des **pannes aléatoires mensuelles** qui réduisent la capacité utilisable, ainsi qu'un **choc climatique de type sécheresse** qui affecte l'hydroélectricité sur plusieurs mois.

L'ensemble de ces aléas est strictement **borné** pour garantir la stabilité du modèle, tout en visant à rester réaliste.

Enfin, lorsque la capacité disponible devient insuffisante, le système déclenche la construction de nouveaux sites selon les règles de planification

=====

Gestion des pénuries

La **gestion des pénuries** repose sur l'observation, à la fin de chaque tick, de l'écart entre la demande nette et l'énergie réellement transmise. Si la production nette est insuffisante, un déficit est mesuré, ce qui permet d'identifier une **pénurie immédiate**.

En parallèle, nous avons le calcul d'un **indicateur de “buffer”** qui compare la capacité restante au tick et la capacité déjà engagée en construction ou en maintenance, à la demande observée. Si ce buffer passe **sous un seuil** défini par l'utilisateur (par défaut, 5%), alors la **construction est déclenchée**.

Cette stratégie distingue ensuite **deux horizons**. Une part du besoin est allouée aux technologies à la **construction/maintenance rapide** (solaire et éolien) pour compenser rapidement les tensions, **même**

lorsqu'il n'y a pas encore de déficit immédiat. Le reste de l'effort est planifié selon **le mix énergétique** cible afin de garantir la cohérence structurelle du système.

Cette logique est, encore une fois, bornée par un plafond de constructions par tick pour éviter les emballements. Ainsi, **la pénurie est à la fois détectée dans le présent, mais aussi anticipée !** Et ce, tout en respectant le mix énergétique de long terme.

Ressources consommées

Nous utilisons trois types de ressources : **l'eau (L_water)**, **la surface au sol (m²_land)** et **le coton (kg_cotton)**. Ces ressources sont demandées à la fois **pendant la production et pendant les phases de construction et maintenance**, ce qui permet de relier l'évolution du parc énergétique aux contraintes écologiques.

Sur la **production**, chaque filière **prélève de l'eau selon un coefficient par kWh selon la technologie utilisée**. La consommation d'eau est distinguée du prélèvement. Une partie est "**consommée / perdue**", le reste est **réinjecté** dans le système. Cette distinction est importante pour l'hydro et le nucléaire, où des volumes significatifs d'eau sont prélevés mais rejetés en très grande majorité (jusqu'à 99% pour une centrale nucléaire en circuit ouvert). La **surface au sol** est également comptabilisée comme une **occupation proportionnelle au nombre et type de sites installés**.

Sur la **construction et la maintenance**, chaque site **consomme à chaque tick une quantité d'eau et de coton**, représentant **les besoins en matériaux, logistique et travaux**.

Toutes ces ressources sont fournies par le bloc **Écosystème**.

Ressources produites

Nous produisons une unique ressource principale, l'électricité, notée **kWh_energy**. Cette ressource est demandée par les blocs **Urbanisme, Transport et Agriculture**.

En plus, la production d'énergie génère des émissions de GES (**gCO2e_emissions**), comptabilisées à chaque tick et transmises au bloc **Écosystème**.

Paramètres

Dans l'interface, les paramètres sont regroupés par catégories. On peut d'abord régler la **capacité initiale du parc (kWh/tick)**, puis ajuster le **mix énergétique**.

La section **Construction** permet de piloter la dynamique d'extension. On peut y contrôler le seuil de buffer déclencheur, les horizons de pipeline "rapide" et "long", la part dédiée à la construction rapide, et le plafond de constructions par tick/filière.

Enfin, la partie **Stochasticité** regroupe l'activation des aléas, le taux de pertes réseaux, l'amplitude de saisonnalité, les niveaux de bruit de demande, ainsi que les probabilités de pannes et de sécheresse et leur durée.

Ces multiples paramètres permettent d'explorer différents scénarios tout en gardant le même cadre de modèle !

Données

Les valeurs utilisées sont des **moyennes annuelles (2022) ramenées au mois**. Les émissions indiquées sont des émissions de cycle de vie (construction, maintenance, exploitation, fin de vie), ce qui inclut donc plus que les seules émissions directes de production.

Production nationale (référence - France 2022)

- Production d'énergie *toute énergie confondue* : **1254 TWh**.
- Moyenne mensuelle : **~104.5 TWh/mois**, donnant donc **~1.045e11 kWh/mois..**

Émissions nationales (cycle de vie)

- Émissions annuelles associées à la production électrique : **30.8 Mt CO2eq**.
- Moyenne mensuelle : **~2.57e12 gCO2e/mois**.
 - Attention : ce total inclut la production de fossiles (gaz, charbon, fioul) et les importations fossiles. Il surestime donc les émissions.

Mix énergétique

- Part brute (nucléaire, solaire, éolien, hydro) : **62.7% / 11.1% / 8.7% / 4.2%**.
- Normalisé : **72.3% / 4.9% / 10.0% / 12.8%**.

Population

- Consommation résidentielle *toute énergie confondue* : **467 TWh**.
 - Moyenne mensuelle : **~38.9 TWh/mois**.
 - À 67 millions d'habitants : **~572 kWh/mois/personne**.
-

Nucléaire

- Infrastructure type : **1 installation = un réacteur**.
- Réacteurs en service (2022) : **56**.
- Production annuelle : **279 TWh = 2.79e11 kWh/an**.
- Moyenne mensuelle : **~2.325e10 kWh**.
- Capacité moyenne par réacteur : **~4.15e8 kWh/mois/réacteur**.
- Surface : les centrales couvrent ~3km² en moyenne avec plusieurs réacteurs -> **~1km²/réacteur**.
- Eau : **2L/kWh** (consommation moyenne).
- Émissions cycle de vie : **12 gCO2e/kWh**.
- Durée de vie : **50 ans**.
- Durée de construction : **10 ans**.
- Durée de maintenance : **20 ans**.
- Besoin de ressources (coton, eau) en construction: **8.3e6 kg/mois et 4.2e7 L/mois**.
- Besoin de ressources (coton, eau) en maintenance: **5.0e6 kg/mois et 2.5e7 L/mois**.
- Hypothèse : le réseau électrique existe déjà.

Solaire

- Infrastructure type : **1 installation = un parc solaire 10 MWc (~25 000 panneaux de 400 Wc).**
- Puissance installée : **10MWc.**
- Irradiation moyenne : **100 kWh/kWc/mois.**
- Production mensuelle : **10 MWc * 100kWh = 1.0e6 kWh/mois.**
- Surface :
 - Surface panneaux seule : **~0.05 km².**
 - Avec espacement, accès, maintenance : **~0.1 km²/parc.**
- Eau : **0.1 L/kWh** (nettoyage)
- Émissions cycle de vie : **~40 gCO2e/kWh.**
- Durée de vie : **30 ans.**
- Durée de construction : **0.8 ans.**
- Durée de maintenance : **0.3 ans.**
- Besoin de ressources (coton, eau) en construction: **1.0e5 kg/tick et 1.0e5 L/tick.**
- Besoin de ressources (coton, eau) en maintenance: **1.5e5 kg/tick et 1.25e5 L/tick.**

Éolien

- Infrastructure type : **1 installation = un parc de 4 turbines de 3 MW.**
- Puissance installée : **12 MW.**
- Facteur de charge moyen : **25%.**
- Production mensuelle : **12 MW * 744h * 0.25 = ~2.2e6 kWh/mois.**
- Surface avec prise en compte de fondations et espacement : **~2.5e5 m² par parc.**
- Eau : **0.004 L/kWh** (nettoyage)
- Émissions cycle de vie : **~12 gCO2e/kWh.**
- Durée de vie : **30 ans.**
- Durée de construction : **0.8 ans.**
- Durée de maintenance : **0.3 ans.**
- Besoin de ressources (coton, eau) en construction: **3.0e5 kg/tick et 2.0e5 L/tick.**
- Besoin de ressources (coton, eau) en maintenance: **2.5e5 kg/tick et 2.5e5 L/tick.**

Hydraulique

- Infrastructure type : **1 installation = une centrale hydraulique.**
- Production moyenne par installation : **1.7e9 kWh/mois.**
- Surface : **1 km² par installation.**
- Eau : **1 L/kWh** (consommation moyenne)
- Émissions cycle de vie : **10 gCO2e/kWh.**
- Hypothèse : parc hydraulique déjà amorti, infrastructure existante.
- Durée de vie : **60 ans.**
- Durée de construction : **10 ans.**
- Durée de maintenance : **5 ans.**
- Besoin de ressources (coton, eau) en construction: **8.3e7 kg/tick et 1.7e7 L/tick.**
- Besoin de ressources (coton, eau) en maintenance: **3.3e7 kg/tick et 1.7e7 L/tick.**

Sources

- RTE :
 - [France 2022 - Electricity Review](#)
 - [Annual Electricity Review 2023](#)
 - SDES :
 - [Bilan énergétique de la France pour 2022](#)
 - [Consommation finale d'énergie par secteur et par énergie](#)
 - Insee : [Production brute et consommation d'électricité](#)
 - EDF : [La consommation d'électricité en chiffres](#)
 - Engie : [Quelle est la consommation d'électricité par personne dans un foyer ?](#)
 - World Nuclear Association : [Carbon Dioxide Emissions From Electricity](#)
 - Concertation-Strategie-Client.gouv.fr : [Dossier de concertation sur le mix énergétique](#)
 - Wikipédia : [Life-cycle greenhouse gas emissions of energy sources](#)
 - Notre-environnement-gouv : [Des chiffres clés pour comprendre la situation énergétique de la France](#)
 - Mon immeuble : [Consommation énergétique des logements : tendances et enjeux](#)
 - SFEN : [Quels sont les besoins en eau d'une centrale nucléaire ?](#)
 - Nouvergies : [FAQ sur les infrastructures énergétiques](#)
-

Tableaux récapitulatif des données par source d'énergie

Source	Capacité par installation en kWh	Surface consommée par installation en m ²	Litres d'eau prélevés par kWh	Litres d'eau consommés par kWh	Émissions de GES en gCO2e émis par kWh
Nucléaire	4.15e8	2.5e6	200.0	2.0	12.0
Solaire	1.0e6	1.0e6	0.1	0.1	40.0
Éolienne	2.2e6	2.5e5	0.004	0.004	12.0
Hydraulique	1.7e9	1.0e6	5040.0	1.0	10.0

Source	Durée de vie (an)	Durée de construction (an)	Durée de maintenance (an)	Consommation durant construction par tick (kg coton / eau L)	Consommation durant maintenance par tick (kg coton / eau L)
Nucléaire	50	10	20	8.3e6 / 4.2e7	5.0e6 / 2.5e7
Solaire	30	0.8	0.3	1.0e5 / 1.0e5	1.5e5 / 1.25e5
Éolienne	30	0.8	0.3	3.0e5 / 2.0e5	2.5e5 / 2.5e5
Hydraulique	60	10	5	8.3e7 / 1.7e7	3.3e7 / 1.7e7

Bloc de l'Écosystème

Introduction

Le bloc **Écosystème** est crucial car il modélise les **ressources naturelles** présentes dans l'environnement que les autres blocs doivent puiser pour assurer leurs **propres productions**, et ainsi **satisfaire les demandes du système**. Il constitue donc la **fondation opérationnelle** du système écotoien. Les ressources naturelles comprennent l'**eau**, le **bois**, la **surface terrestre** et le **gibier**. Leur gestion et leur évolution sont simulées au fil des ticks.

Hypothèses

- La quantité de bois produite est indépendante de la superficie disponible des forêts. La superficie des forêts est donc constante au cours du temps.
- La production de bois est indépendante du cycle des saisons.
- Les quantités de bois et d'eau, ainsi que la superficie maximale terrestre disponible sont plafonnées par une valeur maximale au cours de la simulation, pour garantir un certain réalisme.
- La surface terrestre disponible n'est pas différenciée selon les différents usages (par les autres blocs). Elle est représentée par une seule variable globale.
- Il n'y a pas de spatialisation des ressources naturelles.
- Les terres allouées sont considérées comme telles de manière définitive et ne peuvent être à nouveau disponibles pour de futures allocations.
- La population animale simulée comprend uniquement les espèces chassées en France, et non l'entièreté de la faune en France. Elle ne dépasse pas non plus un seuil fixé.

Modélisation

La modélisation du bloc **Écosystème** repose sur deux sous-agents: `ecosystem_producer` et `ecosystem_consumer`. Etant donné que les ressources naturelles sont régénérées naturellement sans faire appel à des producteurs externes, à l'inverse des autres blocs, `ecosystem_producer` ne gère que les demandes et les stocks des ressources naturelles à chaque tick. Quant à `ecosystem_consumer`, celui-ci ne consomme aucune ressource puisque l'environnement ne fait que d'en fournir. Cet agent n'est donc ajouté que par respect de la définition de l'espèce `consumption_agent` sein de l'API.

Modélisation de la gestion et de la régénération des ressources naturelles

L'eau est présente en quantité initiale dès le lancement de la simulation. Son stock évolue selon les demandes et la régénération naturelle. Cette dernière, effectuée par la fonction `regenerate_resources()` à chaque tick, est une régénération saisonnière. Parmi toutes les ressources naturelles, seule l'eau dépend du cycle des saisons. Cela se traduit par l'ajout d'une quantité d'eau (définie fixement par saison) au stock d'eau actuel. En revanche, le stock ne peut jamais dépasser une capacité maximale définie par la variable `water_max_stock_1`, afin de conserver une cohérence et un certain réalisme du modèle. De plus, nous avons ajouté la possibilité aux autres blocs de rejeter dans l'environnement de l'eau précédemment prélevée, via la fonction `reinject_water_to_ecosystem()` qui est définie dans l'API. Celle-ci appelle la fonction `receive_water_reinjection()` définie dans le bloc **Écosystème** : elle injecte la quantité d'eau passée

en argument au stock d'eau global. Cette fonctionnalité est principalement utilisée par le bloc `Énergie`, comme expliqué dans la partie associée, et participe à l'évolution de la quantité d'eau disponible dans l'environnement au fil du temps.

La surface terrestre disponible est aussi initialisée à partir d'une valeur déterminée. Celle-ci exclut de la superficie totale de la France les espaces terrestres protégés (en France métropolitaine uniquement, hors Corse), ainsi que les forêts dont la superficie est fixée au départ de la simulation et reste constante. La surface terrestre n'est pas régénérée: une fois qu'elle est allouée, elle ne peut plus devenir à nouveau disponible pour les autres blocs à l'avenir, et ce même si elle n'est plus utilisée par le bloc-même qui l'alloue. Nous avons en effet décidé de ne pas attribuer de "durée de vie ou d'usage" aux différentes surfaces, principalement par contraintes de temps.

Le bois est aussi initialement disponible en quantité limitée, variant ensuite selon les demandes et la régénération. La régénération est simplifiée par un ajout d'une certaine quantité constante de bois au stock actuel, à chaque tick et via la même fonction `regenerate_resources()`. Ainsi, comme évoqué précédemment, la production de bois ne dépend pas de la superficie des forêts ni du cycle saisonnier.

Quant à la population animale, elle est initialement présente en nombre limité. Elle ne prend en compte que les espèces les plus chassées en France, à savoir le chevreuil, le sanglier, le pigeon ramier et le lapin de garenne. Elle ne peut pas dépasser une certaine capacité maximale et varie selon le taux de natalité, le taux de mortalité naturelle et le taux de mortalité lié à la chasse. Nous avons tenté de reproduire un modèle Lotka-Volterra ultra simplifié avec ces paramètres pour simuler l'évolution de la population animale au cours du temps, de la manière la plus réaliste possible, dans la fonction `update_wildlife_population()`.

Modélisation de la consommation et des demandes de ressources naturelles

Les principaux consommateurs de ressources naturelles sont les blocs Agriculture, Urbanisme, `Énergie`, mais aussi Population pour la consommation d'eau. A la réception de leur demande, l'agent `ecosystem_producer` vérifie si le stock de la ressource naturelle en question est suffisant pour y répondre. Si c'est bien le cas, la quantité demandée est fournie au demandeur et extraite du stock, sinon le reste du stock disponible est envoyé même s'il ne répond pas à la demande totale, en plus d'un False qui permet d'indiquer cela. Cela se fait donc de la même manière à chaque tick, pour l'eau, le bois et la surface terrestre. Concernant la chasse d'animaux sauvages, le bloc Agriculture fait une demande d'animaux via la fonction `hunt_request()`. En réalité, sans contraintes de temps, elle aurait pu être faite de la même manière que pour les autres ressources naturelles, via la fonction `produce()`, ce qui constitue une amélioration future. Lorsque le bloc reçoit cette demande, il renvoie soit le nombre maximum d'animaux chassés en France par mois, soit un nombre inférieur qui dépend du taux de mortalité lié à la chasse.

Modélisation de la gestion des GES

Dans notre modélisation, et selon la matrice EM, le bloc `Écosystème` absorbe une certaine quantité des GES émis par les autres blocs et suit l'évolution de la totalité des GES présents dans l'atmosphère. Il est donc nécessaire qu'à chaque tick, les quantités de GES soient envoyées par les différents blocs au bloc `Écosystème`, puis reçues par ce dernier et enfin absorbées. Pour l'envoi, nous avons ajouté la fonction `send_ges_to_ecosystem()` dans l'API pour que tous les blocs puissent aisément l'appeler. Pour la réception, nous avons codé la fonction `receive_GES_emissions()` du côté d'`Écosystème` qui, comme le nom l'indique, lui permet de recevoir les quantités de GES émises. Cette fonction est précisément

appelée par la fonction `send_ges_to_ecosystem()` au moyen d'une instruction `ask`. Dès réception, une certaine partie des ces quantités sont absorbées par les surfaces forestières et les surfaces d'eau à partir des données de GES absorbés par un m² de chacune de ces deux surfaces, et ce par mois. Enfin, les quantités de GES présentes dans l'atmosphère sont mises à jour.

Données à prendre en compte

Nous nous sommes basées sur des données réelles en France, principalement de 2022 quand cela était possible, pour être aligné le plus possible avec les données de la même année des autres blocs.

Surfaces

- La surface totale française est estimée à **5.4394e11 m²**. Valeur qui se trouve d'ailleurs dans le cahier des charges.
- A cela, nous retirons les terres protégées qui se trouvent être **~28%** du territoire afin d'avoir les terres "exploitables" par les autres secteurs.
- La surface totale occupée par les forêts en France est estimée à **1.77e11 m² (32% du territoire)**.
- On peut estimer la surface des plans d'eau en France à hauteur de **5% du territoire total**.

Eau

- En moyenne, **208 milliards m³** d'eau sont renouvelés chaque année en France. On peut donc supposer un stock initial et un stock maximum de **2.10e14 L** d'eau sur le territoire. Ce stock correspond aux nappes exploitables, aux réservoirs, aux lacs...
- Par conséquent, nous avons également pris **une régénération moyenne d'eau disponible par mois selon les saisons**. Sur une année, en moyenne, les régénérations saisonnières sont de **48% en hiver, 40% en automne, 10% au printemps et 2% en été**. Ces régénérations comprennent les précipitations, la recharge des nappes phréatiques, l'écoulement des rivières, etc. À partir de ces proportions annuelles, nous avons ensuite dérivé des valeurs mensuelles afin de déterminer, pour chaque mois, la quantité d'eau à ajouter au stock disponible.
- Par la surface des points d'eau, et un coefficient d'absorption de GES par surface d'eau qu'on instancie à **0.002 kgCO2e/m²/month**, on pourra calculer l'absorption française de GES en moyenne par mois, par l'eau.
- On peut noter qu'en 2022, 29.1 milliard de m³ d'eau douce ont été prélevés, ce qui équivaut à **2.43e12 L/mois**.

Forêts et bois

- Le stock de bois vivant fin 2022 est de 3.1 milliards de m³, donc **1.55e12 kg** sera notre stock initial et maximal de bois dans notre modèle.
- De plus, la croissance biologique du bois est estimée à 87.8 millions de m³/an, ce qui équivaut à **3.66e9 kg/mois**.
- Par la surface des forêts, et un coefficient d'absorption de GES par surface de forêts qu'on instancie à **0.0174 kgCO2e/m²/month**, on pourra calculer l'absorption française de GES en moyenne par mois, par le bois.

Population animale

- La population animale comprend quatre espèces parmi les plus chassées en France: le chevreuil, le sanglier, le lapin de garenne et le pigeon ramier.

- Elle comprend initialement **9 500 000 animaux au total**, soit l'addition des populations annuelles moyennes de chacune des espèces.
- La capacité maximale est de **10 000 000**. Elle correspond à l'addition de la borne supérieure des populations de chaque espèce.
- Le taux de natalité est de **0.15**, le taux de mortalité naturelle de **0.02** et le taux de mortalité par la chasse de **0.02**. Etant donné que chaque espèce a ses propres taux qui diffèrent énormément entre eux, et que la moyenne des valeurs donnait des résultats incohérents, nous avons adapté ces valeurs de notre mieux au profit de la cohérence. Cela doit tout de même être revu plus en détail.
- Le nombre maximal d'animaux pouvant être chassés par mois dans la simulation se base sur le nombre total de gibier chassés en France en 2022, nombre qui s'élève à **38 millions**.

Sources

- SDES : [Les comptes de la forêt française de 2007 à 2022](#)
- SDES : [Panorama des dispositifs de protection des espaces naturels terrestres et marins en France au 1er janvier 2025](#)
- SDES : [L'eau en France : ressource et utilisation – Synthèse des connaissances en 2022](#)
- SDES : [Les prélèvements d'eau douce par usage en France en 2022](#)
- SDES : [Les forêts en France – Extrait du Bilan environnemental 2024](#)
- GEO: [Quels sont les animaux les plus chassés en France ? - Geo.fr](#)
- [Espèces chassables - Fédération des Chasseurs du Rhône](#)
- [25 à 38 millions d'animaux tués à la chasse chaque année - Animal Cross](#)
- [Les chasseurs ne sont pas responsables de l'augmentation des populations de sangliers. – Chroniques cynégétiques](#)
- Vidéo : [Près de 2 millions de sangliers en France grâce au réchauffement climatique - Chassons.com](#)

Bloc Population

Introduction

Le bloc Population vise à modéliser l'évolution démographique de la société écotopienne au cours du temps, en intégrant à la fois des facteurs biologiques (mortalité / natalité), sociaux (bien-être) et matériels (accès à l'eau et à la nourriture). La population interagit avec les autres blocs du système, notamment l'Agriculture pour l'alimentation, l'Écosystème pour l'eau, l'Urbanisme pour les logements, et le Transport.

Hypothèses

- Les taux de natalité et de mortalité sont influencés par le bien-être des individus.
- Le bien-être dépend de l'accès aux ressources essentielles (eau, nourriture, logement, transports).
- La population est répartie en différentes catégories d'âge et de sexe, chacune ayant des besoins spécifiques.
- On suppose qu'un agent né dans un mini-ville reste dans cette mini-ville toute sa vie.
- Les migrations entre mini-villes ne sont pas modélisées dans cette version.
- Les catastrophes naturelles affectant la population ne sont pas prises en compte dans cette version. (Sauf la famine liée à un manque de ressources, qui aurait un impact sur la mortalité)
- La distribution locale des ressources est supposée être uniforme dans le pays, sans disparités régionales.
- Le taux de mortalité augmente pendant l'hiver, et diminue pendant l'été.
- Une population qui a tous ses besoins de base couverts (eau, nourriture, logement, transport) a un niveau de bonheur élevé.
- Une population plus heureuse a un taux de natalité plus grand.

Modélisation

Nombre de personnes par agent

Afin de limiter la complexité du modèle pour pouvoir le faire tourner assez rapidement, on a dû modéliser chaque agent avec un grand nombre d'individus représentées (19500 finalement)

Consommation de ressources

Pour chaque agent, il y a des valeurs d'âge qui déterminent la consommation de l'eau et la nourriture. Par exemple, un enfant consomme moins qu'un adulte, et une personne âgée consomme aussi moins qu'un adulte, mais plus qu'un bébé. Si les ressources demandées ne sont pas suffisantes, et qu'il y a quand même une augmentation dans les morts en excès liés à cette ressource même si on le reçoit, cela signale une sous-demande, et on augmente la demande pour le prochain pas de temps. Inversement, si les ressources demandées sont plus que suffisantes, on diminue la demande pour le prochain pas de temps.

Mortalité / Natalité liée aux ressources

Les coefficients de mortalité et de natalité sont ajustés dynamiquement en fonction des ressources fournies:

- **Calories**: Si l'apport calorique moyen est calculé être inférieur à la demande calorique de la population (en moyenne, pour une personne c'est 2000, mais c'est dynamique par rapport à la distribution d'âge de la population) le coefficient de mortalité lié à l'alimentation augmente
- **Eau**: Si l'apport de l'eau est inférieur à la demande (rang idéale 2-3L/jour en moyenne), le coefficient de mortalité lié à l'eau augmente.
- **Logement**: Un déficit de logement augmente le taux de mortalité, et inversement, un surplus de logement disponible a un effet positif, cela augmente le taux de natalité.
- **Bonheur**: Le bonheur global, influencé par les ressources et les transports, modifie la natalité, une population plus heureuse a un taux de natalité plus grand, plus stressé, moins grand.

Interaction avec les Mini Villes

Chaque agent est associé à une mini-ville spécifique, une qui a assez de capacité pour "lui" contenir (car chaque agent représente un grand nombre d'individus), ce qui permet de modéliser les dynamiques démographiques locales.

Données

Pour les besoins et métriques

- Nourriture

Les besoins alimentaires sont estimés à partir de recommandations nutritionnelles standards. Pour une adulte moyen, l'apport énergétique par jour de référence est fixé autour de 2000 kcal/jour, valeur couramment utilisée par le WHO (l'Organisation mondiale de la santé) et la FAO (L'organisation pour l'alimentation et l'agriculture). Cette valeur est ensuite ajustée dynamiquement en fonction de la distribution par âge de la population : les enfants et les personnes âgées ont des besoins caloriques plus faibles que les adultes en âge de travailler.

- Eau

Un individu moyen a besoin de 2 à 3 litres d'eau potable par jour, en tenant compte de l'hydratation directe et indirecte (boissons, alimentation). Dans le modèle, cette valeur moyenne est utilisée comme référence agrégée, ajustée par la taille de la population et les âges des agents individuels. Lorsque la quantité d'eau fournie par le bloc Écosystème est inférieure à cette demande, le coefficient de mortalité augmente.

- Logement

Le logement est décrit comme un besoin fondamental influençant directement la mortalité et la natalité. Un déficit de logements cause une augmentation de la mortalité (exposition accrue, conditions sanitaires dégradées) tandis qu'un accès suffisant et stable au logement favorise des conditions de vie propices à la reproduction. Ce choix s'appuie sur des travaux montrant une corrélation entre précarité résidentielle, dégradation de la santé et surmortalité, ainsi qu'un lien entre sécurité résidentielle et comportements démographiques.

- Bonheur

Le bonheur est utilisé comme un indicateur synthétique de bien-être social.

Il est influencé dans le modèle par la satisfaction des besoins essentiels (eau, nourriture, logement) ainsi que par l'accessibilité aux transports, qui conditionne l'accès aux services, à l'emploi et aux interactions sociales.

De nombreuses études montrent que les indicateurs subjectifs de bien-être augmentent significativement lorsque les besoins fondamentaux sont satisfaits, avant de se stabiliser à des niveaux de revenus ou de confort plus élevés. Dans cette logique, le bonheur agit comme une variable intermédiaire reliant conditions matérielles et dynamiques démographiques.

Sources

- Human Energy Requirements
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/65875dc7-f8c5-4a70-b0e1-f429793860ae/content>
- Nutrition and Hydration Requirements In Children and Adults
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK562207/#>
- World Happiness Report (ONU)
- Maslow, A. – *A Theory of Human Motivation*
- OECD – *How's Life? Measuring Well-Being*

Bloc Transport

Introduction

Le bloc transport simule les déplacements des personnes et des matériaux dans le projet, il met à disposition des ressources de transport aux différents blocs, il simule les déplacements mensuels de la population, il gère les stock de véhicules, et le tout basé sur différentes échelles de déplacement. Le bloc a également utilisé 2 fichiers de simulation supplémentaires pour affiner les comportements des populations aux différentes échelles.

Modélisation

Véhicules

Voici les véhicules considérés dans notre modélisation :

- **Marche à pieds** : Méthode de déplacement généralement considérée comme un véhicule dans la modélisation pour simplifier le code.
- **Vélo** : à disposition en libre service pour se déplacer dans les mini-villes.
- **Taxi** : Il n'y a pas de voitures personnelles, mais il y a comme même des taxis qui sont utilisés rarement par les écotopiens.
- **Minibus** : Disponible pour les déplacements dans les mini-villes.
- **Train** : Disponible pour les déplacements plus longs, chaque mini-ville possède une gare en son centre.
- **Camion** : Seul moyen de transport gérant le déplacement de matériaux.

Pour chaque véhicule, nous avons recherché les données suivantes :

- La **vitesse** (km/h) (non utilisée dans le code mais parfois utilisée pour les données de distance)
- La **quantité** (nombre de véhicules en France) (macro)
- La **capacité moyenne** (personnes ou kg par unité de véhicule)
- La **consommation électrique** (kWh/km)
- La **durée de vie** (mois)
- Les **émissions** (gCO₂/km)
- La **distance maximale** qu'un véhicule peut raisonnablement parcourir par mois (km) (macro)
- Le **coût en énergie** pour la création du véhicule (kWh)
- Le **taux d'utilisation** pour chaque échelle (1,2,3) (macro)

Tableau minimal des valeurs

Véhicule	Marche	Vélo	Minibus	Taxi	Train	Camion
Vitesse (km/h)	(5)	(25)	(15)	(50)	(150-360)	(<50)
Quantité	-	31 464 000	94 000	119 000	4 400	625 000
Capacité (personne ou kg)	1	1	6	2	258	12 000
Consommation (kWh/km)	-	0,001	0,33	0.1	15,0	1,0
Durée de vie	-	84	98	138	324	116

(mois)						
Émission (gCO ₂ /km)	-	23	500	100	7 200	1 000
Distance max (km/mois)	90	900	5 000	8 300	80 000	3 508
Coût création en Énergie (kWh)	0	6.7	4 596	1 532	375 000	4 596

Il y a beaucoup de sources et explications pour les différentes valeurs trouvées, elles sont toutes disponibles dans le csv fourni en annexe avec le rapport.

Échelles

Nous avons décidé de modéliser le transport sur 3 échelles différentes :

échelle I - PAYS : Déplacements inter-régions	échelle II - REGION : Déplacements hors de la mini-ville (intra-région)	échelle III - MINI-VILLE : Déplacements dans la mini-ville

Cette modélisation permet de distinguer les modes de transports utilisés en fonction du type de déplacement ainsi que la gestion des stocks de véhicules. Chaque mini-ville est un agent possédant son propre stock de véhicules et pouvant faire des demandes en ressources de transport ou véhicules au bloc pour répondre à la demande en transport de sa population à chaque Tick (cette quantité est décrite davantage dans la section Simulation). En pratique cette demande est faite depuis le bloc de transport lui même lorsqu'il traite les agents de mini-villes car nous n'avons pas eu le temps de fixer les problèmes de dépendances dans l'implémentation (idéalement nous avions prévu que les agents eux même gèrent ces demandes).

Nous avions également prévu d'agentifier chaque région pour modéliser les différences entre régions au cours de la simulation, cependant sommes arrivés à court de temps et avons donc décidé combiner les stocks de trains, comportements des populations, et ressources de transports avec l'échelle 1 (la grande majorité des trajets de l'échelle 2 étaient déjà estimé comme étant fait par trains, nous avons donc ajouté à la simulation de l'échelle 1 des aspects de l'échelle 2).

L'objectif d'utiliser ces agents est de spatialiser les consommations, par exemple pour que le bloc agriculture puisse consommer des ressources de transport d'une région particulière (ou le bloc possède divers cultures par exemple). Cependant nous n'avons pas eu le temps d'implémenter ces aspects entre les différents blocs.

Taux d'utilisation des véhicules par échelle

Les valeurs de la France actuelles pour les taux d'utilisations des véhicules sont fortement incompatibles avec les taux qui seraient utilisés dans Ecotopia. En effet, actuellement il y a un très fort réseau routier qui est fortement exploité avec 63-73% des trajets effectués en voiture. Or, effectuer la majorité des trajets en voitures individuelles n'est pas du tout en accord avec les principes de la société Ecotopia.

On a donc jugé que les statistiques actuelles des taux d'utilisation ne sont pas exploitables vu que les comportements sont tellement différents. C'est pourquoi nous avons créé nos propres taux d'utilisation des véhicules basés sur notre compréhension/suppositions de l'utilisation des transports par les écotoiens pour le rendu Macro (Le détail du raisonnement de chaque valeur était donné dans le csv fourni en annexe avec le rapport). Mais pour le rendu Micro nous avons décidé d'avoir des valeurs plus justifiées par l'utilisation de simulations externes du transport des populations à l'échelle 3 ainsi que l'échelle 1/2 à la fois (cf section simulations).

Ressources de transport

Le bloc de Transport a commencé dans le rendu macro avec 6 ressources différentes (3 échelles * 2 types), au final nous sommes resté sur une seule de matériaux (seul le bloc agriculture fait une demande à l'échelle 2 de matériaux) et nous avons combiné l'échelle 1 et 2 de populations :

- Distance parcourue pour 1 personne (km) à l'échelle I ou II : $km/person_scale_1/2$
- Distance parcourue pour 1 personne (km) à l'échelle III : $km/person_scale_3$
- Distance parcourue pour 1 kg de matériel (km) à l'échelle II : km/kg_scale_2

La création de ressources se fait sur demande, lorsqu'un bloc a besoin de ressources de transport il crée une demande en nombre de kilomètres par personne ou kg, par exemple "2km pour 4 individus à l'échelle 3" => 8 unités de $km/person_scale_3$. Le bloc de transport calcule alors l'utilisation pour chaque type de véhicule en accord avec les taux d'utilisation des véhicules, il crée ensuite une demande en énergie correspondante ainsi qu'une émission de GES correspondante. Si il n'y a pas assez de véhicules disponibles pour traiter la demande, alors de nouveaux véhicules sont créés (cf section [Gestion des Véhicules](#)). Dans la version Macro il n'y a pas de gestion de la pénurie, le bloc Transport va toujours accepter les demandes en transport même si le bloc Énergie refuse nos demandes en énergies, cet aspect sera géré dans la version Micro.

Fonctionnement à chaque tick

A chaque tick le bloc de Transport effectue les actions suivantes dans l'ordre :

- Collection des statistiques du tick précédent et envoi au bloc Population du taux de satisfaction des demandes en transport du tick précédent pour impact sur la population.
- Mise à jour de l'age/quantité de camions disponibles en France (cf section [Gestion des Véhicules](#))
- Mise à jour de l'age/quantité des véhicules dans chaque mini-ville, on regarde également si la quantité restante de chaque véhicule est suffisante pour répondre aux besoins de la population de la ville (cf simulations), si non, on essaie de créer suffisamment de véhicules additionnels correspondants.
- Transports de la population des villes (échelle 3) : pour chaque ville nous utilisons la quantité de transport de chaque véhicule trouvée en simulation de l'échelle 3 pour 10k habitants. La quantité utilisée est multipliée par le ratio d'habitants réels de la ville / 10k, cette valeur est également ajustée au nombre de véhicules disponibles de la ville par rapport à la quantité qu'elle est censée avoir pour satisfaire les habitants. Donc pour résumer : pour chaque ville le bloc fait des demandes en énergie

- pour répondre aux besoins de la population de la ville en fonction du stock de véhicules et population de la ville (le tout basé sur les quantités de transport de la simulation de l'échelle 3).
- Transports de la population sur la France entière (échelle 1 et 2) : Similaire à l'étape ci-dessus mais pour les trains de la France entière (un seul stock de véhicules). Pour répondre aux besoins en transports à l'échelle 1/2 de la population basé sur la population globale, la quantité de trains disponibles et le tout basé sur les résultats de la simulation de l'échelle 1/2.

Gestion des Véhicules

Le bloc Transport traque le stock de chaque type de véhicules. Dans la version Macro, ce stock est centralisé pour toute la France entière, dans la version Micro chaque mini-ville s'occupe de son propre stock, pour les régions nous n'avons pas eu le temps de les implémenter donc elles partagent leur stock avec la France entière (donc un stock de trains partagé pour échelle 1 + 2).

L'âge des véhicules est stocké simplement dans des listes où l'index correspond à l'âge (en tick) du véhicule, et la valeur au nombre de véhicules ayant cet âge. À chaque tick, les véhicules ayant atteint leur fin de vie sont supprimés et les valeurs sont décalées pour simuler le vieillissement des véhicules. Chaque type de véhicule a donc sa propre liste avec une longueur différente, et cela pour chaque ville individuellement.

L'âge des véhicules est réparti uniformément dans la plage [0, durée de vie] au début de la simulation. En simplifiant, un véhicule peut vieillir de 0, 1 ou 2 mois par ticks. Cela permet de répartir l'âge des véhicules et d'avoir en conséquence des créations de véhicules plus réparties dans le temps, plutôt que d'avoir un âge fixe pour tous les véhicules. Cette méthode est celle utilisée pour le rendu Macro et est toujours utilisée pour les camions, cependant elle a été abandonnée pour les autres véhicules pour de meilleures performances (véhicules vieillissent de 1 mois par tick).

Pour la construction de nouveaux véhicules, nous utilisons du coton (transformé en plastique ecotopien pour les voitures) ainsi que de l'énergie pour l'assemblage/création des parties.

La quantité de km disponibles par tick pour les camions est calculée de la manière suivante :

$$\text{Capacité (kg)} \times \text{Distance max (km/mois)} \times \text{Quantité (nombre de véhicules)}$$

A chaque tick, la quantité de km disponibles pour le tick est donc initialisé à cette valeur, puis elle est réduite à chaque demande. Si elle devient négative, de nouveaux véhicules sont produits pour revenir dans le positif.

Pour le transport de population la consommation est basée sur les valeurs de simulations (quantité de km parcourus par types de véhicules par échelle pour 10k habitants (valeur multipliée par le ratio d'habitants lorsque le nombre d'habitants n'est pas 10k)). Ainsi que la quantité de chaque type de véhicules nécessaire par échelle pour répondre à la demande pour 10 habitants (valeur multipliée par le ratio d'habitants lorsque le nombre d'habitants n'est pas 10k))

Simulations

Pour le rendu Micro nous avons fait 2 fichiers de simulations additionnels non reliés à la simulation principale ("models/transport_simulations/CitySimulation.gaml" et "models/transport_simulations/FranceTransportSimulation.gaml").

Pour les loisirs, nous avons suivi les règles et nous les avons interprétés de cette manière

On définit les règles suivantes pour le choix des destinations de loisirs :

- 50% des loisirs se feront dans un espace naturel accessible : point d'eau (lac, rivière, mer...), forêt, montagne. Par défaut, si aucune de ces zones n'est accessible à proximité (< 2h de trajet), on choisira une destination en extérieur en dehors de la mini-ville de résidence.

-> **40% échelle 3, 5% échelle 2, 5% échelle 1**

- 30% auront lieu en extérieur dans leur mini-ville de résidence ou en bordure de celle-ci.

-> **5% échelle 1, 25% échelle 3**

- Les 20% restants resteront à leur domicile.

-> **échelle 3 (fixe)**

C'est à dire

10% -> échelle 1, 5% -> échelle 2, 85% -> échelle 3

Gestion de la demande en transport pour la population à chaque Tick

Pour estimer la demande en transport de chaque habitant à chaque tick, nous avons simulé les écotopiens sur l'échelle de la France puis sur l'échelle d'une mini-ville.

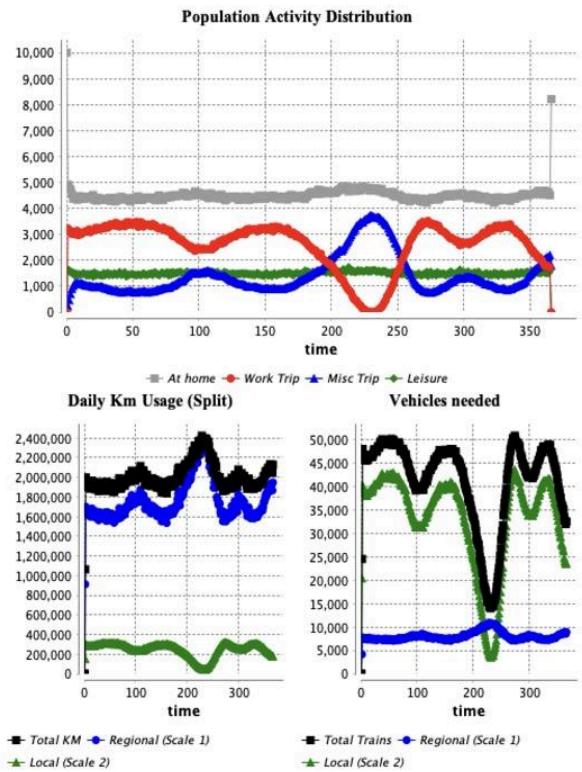
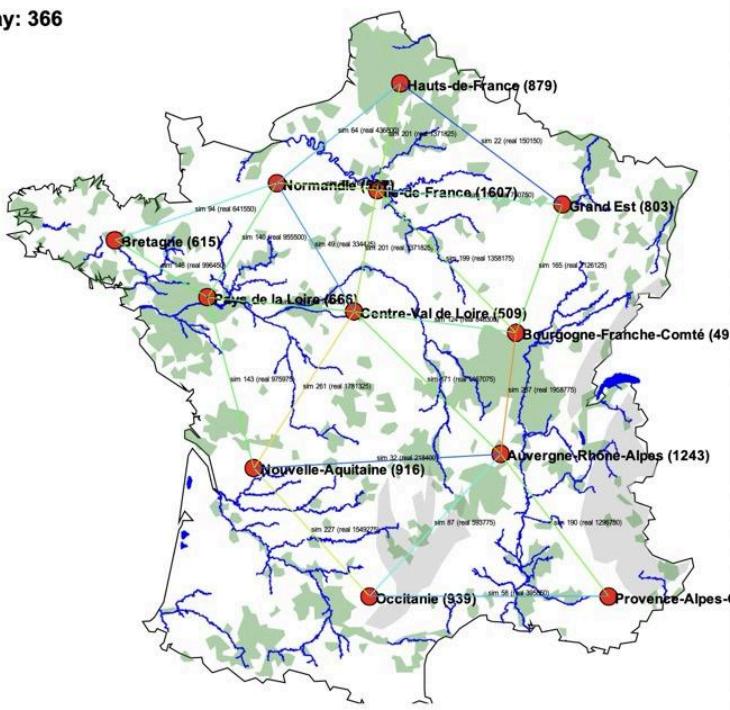
Les simulations avaient pour objectif d'obtenir les valeurs suivantes :

- Quantité de km parcourus par tick pour chaque type de véhicule pour chaque échelle pour une quantité donnée d'habitants (10k pour les mini-villes et 68m pour la France) (somme des déplacement de chaque tick)
- Quantité de véhicules nécessaires pour répondre à la demande correspondante (pic d'utilisation des véhicules nécessaires sur le tick (heures de pointe)).

Ces valeurs sont ensuite utilisées directement dans la modélisation principale pour chaque ville (et trains pour l'échelle 1/2). Pour se faire les valeurs sont multipliées par le ratio "habitants réels" / "habitants simulation", donc par exemple si il y a une ville avec 15k habitants, la consommation et véhicules nécessaires sera la valeur de simulation x1.5.

Échelle 1 & 2 (France):

Day: 366



(Le comportement peut être visualisé dans le code en mettant population_size à 1. Les données sont sauvegardées dans models/transport_simulations/france_transport_results.csv)

Nous avons 12 noeuds correspondant aux 12 régions de la France. Nous omettons la Corse et les DOM pour simplifier et utiliser les GIS fournis. Il y a un arc entre chaque région.

Les régions sont chargés depuis un CSV contenant la population par région, sommant à 68.25M. Chaque région à également un arc supplémentaire pour représenter le flux dans sa région locale (échelle 2).

Cette simulation sert à calculer le nombre de trains nécessaires pour l'échelle 1, ainsi que le km utilisé des trains.

Puisque nous avons 10000 agents et 68.25M écotopiens, un agent correspond à 6825 agent. Cette valeur est calculée automatiquement et rajouté au nombre de personnes prenant un transport donné.

Nous supposons qu'un train fait 10 trajet sur son arc par jour, et que leur capacité est de 500 (valeurs expliquées dans la section des valeurs).

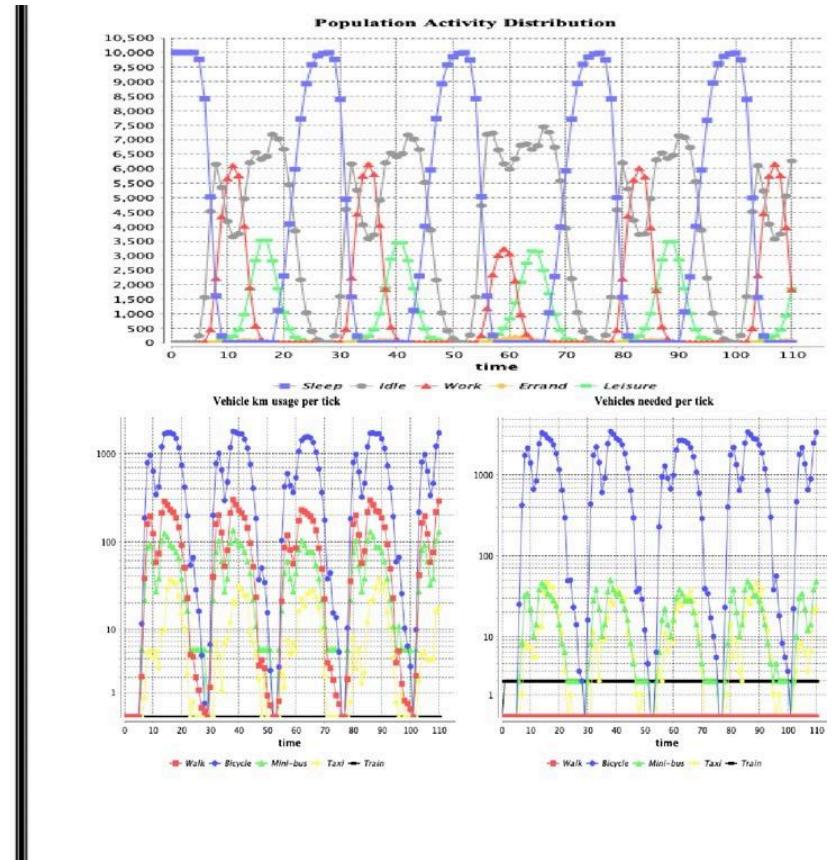
Un écotopien peut être dans les **états** suivant (nous utilisons des gaussiennes/poisson basés sur des valeurs typiques françaises ou écotopiennes):

- At home (chez soi)
- Work trip (au travail):
 - Échelle 1: 1x trajet professionnel long par an, en moyenne long de 1.2 jours.
 - Échelle 2: 2x par semaine pendant 1 jour dans une ville voisine (constellation donc 1~10km)
- Misc trip : ~1x par mois, en moyenne long de 5.2 jours.
- Leisure (loisirs): 80% ici vont dans une autre région et le reste 20% vont dans un point local.

Suppositions:

- nous avons omis une simulation séparée à l'échelle 2, ce qui fait qu'il y a des imprécisions comme avoir 1 arc par région en local, que nous n'avons pas. Cependant nous avons multiplié la valeur utilisée par cette échelle par 4, en supposant qu'il y ait 4x plus de rails en échelle 2 qu'en échelle 3 (justification dans détails).
- Nous avons pris des probabilités de vacances/travail par mois pour créer des courbes basés sur des données trouvées.

Échelle 3 (mini-ville):



(Le comportement peut être visualisé dans le code en mettant population_size à 1. Les données sont sauvegardées dans models/transport_simulations/city_results.csv)

Nous avons 10000 agents, donc chaque agent correspond à 1 écotoien.

Au début de l'exécution, chaque agent crée un planning de sa semaine.

Un écotoien peut être dans les **états** suivant (nous utilisons des gaussiennes basés sur des valeurs typiques françaises ou écotoiennes):

- Sleep (en train de dormir): Il se lève en moyenne à 9h et dorment à 23h30.
- Idle (chez soi)
- Work (au travail): 3.5x par semaine en moyenne (écotopia 20h/sem). Il travaille pendant 5h par jour du matin au soir.
- Errand (des courses et misc): 0.5x par semaine en moyenne (1/2 personne y vont), 1 ou 2h.
- Leisure (loisirs): tous les jours, 2h en moyenne. 40% vont dans un point de nature (dans la ville, le reste 10% est calculé dans l'autre simulation), 15% sur les bordures (zone verte) et 20% restent chez soi.

Pour le **mode de transport**, voici la logique basée sur la distance:

- <100m: à pied
- <500m: à vélo (+50m à pied)
- Si prendre le bus est plus court, il prend le bus (+ pied/vélo pour y aller/descendre)
- Sinon, il prend le taxi 3% du temps, et marche à pied (50m) + vélo pour le reste du temps.

Système de bus:

- Chaque heure, le bus fais 1 tour complet de la ville (8 noeuds). On compte l'utilisation de chaque arc, et le nombre de bus nécessaire est dérivé à partir de cette valeur.

Suppositions:

- Le taxi à 1 personne, pour simplifier car il faudrait tracker les routes et familles/amis pour voir si plusieurs personnes prennent le même taxi.
- L'écotoien travaille moins le mercredi, le samedi et surtout le dimanche.

Gestion des pénuries :

Le bloc de transport peut obtenir des pénuries uniquement dans les cas où le bloc Énergie ou Agriculture refuse les demandes en "kWh energy" ou "kg_cotton" respectivement. Lorsque le bloc crée des véhicules il envoie une demande en énergie et coton, si il reçoit une portion de l'énergie demandée alors il crée autant que possible de véhicules avec les ressources fournies et note les véhicules manquants. Lors de la création de ressources de transport, le bloc fait une demande en énergie, de manière analogue, si il reçoit une portion de l'énergie demandée alors il crée autant de ressources que possible avec, puis note la quantité de ressources non créées. On note également la quantité de coton et d'énergie manquant dans les demandes effectuées.

Pour le transport de matériaux nous refusons la demande si nous observons des pénuries. Pour les demandes de transport de population nous créons tout de même les ressources mais notons la quantité manquante.

Cette quantité est ensuite envoyée à la fin du tick de transport au bloc de population sous la forme d'un taux de complétion des demandes entre 0 et 1 pour affecter la population.

Structure du code

Variables globales

- Les inputs/output de production, émission (`production_inputs_T`, `production_outputs_T`, `production_emissions_T`)
- Les véhicules et leur données (`vehicle_data`)
- La répartition des véhicules par échelle et type (`modal_split`)
- La quantité d'énergie nécessaire pour la création de chaque véhicule (`vehicle_creation_energy_cost`)
- La consommation des humains par individu par échelle et type (`individual_consumption_T`)
- Des compteurs
- Un nombre d'humains par agent (ici 1 agent représente 6700 humains, comme dans les autres blocs)

species transport

- Cette partie collecte les données sur le nombre de véhicules total/disponibles/créés et leur âge
- Elle crée un producteur et un consommateur de transport.
- Elle met à jour ces données à chaque tick.
- Dans `create_new_vehicles`, nous créons des véhicules en supposant avoir l'énergie nécessaire.
- `population_activity` exécute la consommation de la population et la production/consommation des demandes
- `transport_producer, produce` qui envoie les GES, crée les véhicules et produit les demandes avec les demandes d'énergie
- `transport_consumer` qui contient la consommation d'un individu

experiment

- Nous avons 12 graphiques (cf image résultats/analyse). Il y a :
 - `production_outputs`: La consommation de la population et le service transport réalisé (2 graphiques)
 - L'énergie utilisée et les GES émis (en g de CO2) (2 graphiques)
 - La répartition de temps restant des véhicules jusqu'à leur casse (4 graphiques)
Et en bas,
 - Le nombre total (stock) de véhicules par type de véhicule
 - Les km utilisés par type de véhicule

- Le nombre de véhicules créés
- Le nombre de véhicules non utilisés

Nous avons 2 fichiers supplémentaires:

- CitySimulation.gaml
- FranceTransportSimulation.gaml

Matrice EM

- Le bloc Transport produit des ressources de transport (décliné en 6 variantes : $km/person_scale_1$, $km/person_scale_2$, $km/person_scale_3$, km/kg_scale_1 , km/kg_scale_2 , km/kg_scale_3), ces ressources n'ont pas de stock et sont créées sur demande pour le tick courant.
- Le bloc Transport fait des demandes de kWh *energy* au bloc Énergie
- Le bloc Transport créé des émission de GES, transmises au Bloc de l'Écosystème
- Le bloc Transport transmet à chaque Tick le taux de complétion des demandes en transport (valeur entre 0 et 1, avec par exemple 0.8 = 80% des demandes en transport (en km) sont complétées correctement) au bloc de Population qui l'utilise ensuite pour affecter la population.

Hypothèses / Simplifications supplémentaires

Voici une liste des hypothèses/simplifications supplémentaires en plus de celles mentionnées au cours du rapport jusqu'à présent :

- Les transports n'émettent pas de gaz à effet de serre en CO2 car ils sont électriques, et nous n'avons pas de méthane non plus (le CDC indique "Gaz à Effet de Serre (GES), ici : CO2 + méthane"). Nous négligeons les particules fines venant des pneus/freins dans ce rapport initial. Cependant, les données sur les émissions en CO2 étant souvent en kg/km, nous avons choisi de prendre en compte les GES émis pas pendant la construction mais pendant l'utilisation des transports.

Quelques Sources:

Répartition par heure: des engins de déplacement personnel motorisés (EDPm) donc vélos pour nous

<https://www.francemobilites.fr/observatoire-micro-mobilite/tableau-bord>

Population par région

<https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/france/structure-population/regions/>

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/comment-les-francais-voyagent-ils-en-2019-resultats-de-l-enquete-mobilite-des-personnes>

Voyage pro: 1.2 nuits

Voyage personnel 5.2 nuits

Calcul du nombre d'utilisation par arc pour 1 train:

Distance moyenne entre arcs: 230km

Si vitesse = 200km/h

<https://www.sncf-connect.com/home/doorToDoor/itineraries>

et 6h~23h: 17h total

Le train mets 1h9m

10m de retournement en moyenne d'après:

<https://maligne.fr/mais-est-ce-vraiment-si-complique-de-retourner-un-train/#:~:text=En%20moyenne%2C%20il%20faut%20une.ou%20diminuer%20de%20quelques%20minutes.>

Mais supposons qu'un TGV est plus long: 30m

total 1h39m

$(17*60)/(60+39) = 10.3$

-> 10 trains par jours

Mais il faut un train dans les 2 sens

Normalement cette valeur dépend de la vitesse et de la longueur, mais pour simplifier, on prend la moyenne.

Pour les trains régionaux, la distance et la vitesse seront plus basses en même temps.

-> **10** / train (échelle 1)

<https://www.autorite-transports.fr/wp-content/uploads/2020/07/comparaison-france-europe-transport-ferroviaire.pdf>

27800km de ligne

les arcs: 5300km total

27800-5300 = 22500

En supposant quelques km de plus non local: /2 : 11250

On suppose que la longueur des rails est 2x plus en local (échelle 2)

-> **20** / train (échelle 2)

Heure dormir

<https://www.francebleu.fr/infos/sante-sciences/les-francais-dorment-peu-moins-de-7-heures-par-nuit-1552368196>

Bloc Urbanisme

1. Introduction

Le bloc **Urbanisme** modélise la capacité d'accueil de la population via le **parc de logements**, l'**occupation du foncier constructible**, et les **flux de ressources** associés à la construction et à l'usage des logements. Il agit comme un nœud d'interaction entre plusieurs secteurs : il consomme des matériaux et de l'énergie, mobilise du foncier, et influence indirectement les dynamiques de population via la capacité d'hébergement disponible.

Dans cette version **micro**, le territoire est représenté par **50 mini-villes**, chacune portant ses propres contraintes (foncier, stock de logements, commandes en cours). Ce choix rend le modèle lisible (hétérogénéité inter-villes), tout en gardant une logique agrégée (pas de bâtiments individuels).

Ordres de grandeur (références)

- Parc résidentiel : **~37,6 millions de logements** en France (hors Mayotte) au 1er janvier 2022.
www.insee.fr/fr/statistiques/6653801
- Population : **~68,0 millions d'habitants** au 1er janvier 2023.
www.insee.fr/fr/statistiques/6687000
- Construction neuve (indicateurs publics) : suivi des logements autorisés / mis en chantier par le SDES/Sitadel2
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/construction-de-logements-resultats-fin-septembre-2024-france-entiere>

2. Architecture et entités

2.1. Agent mini_ville (fichier MiniVille.gaml)

Une **mini-ville** est l'unité spatiale micro du système. Urbanisme y est représenté par des variables agrégées :

Foncier

- **buildable_area** : surface constructible totale (m^2)
- **used_buildable_area** : surface déjà consommée (m^2)
- **remaining_buildable_area** : surface restante (= buildable – used)

Stock de logements

- **wood_housing_units, modular_housing_units**
- **housing_capacity** : capacité totale d'hébergement (personnes), calculée via **capacity_per_unit** :
 - bois : 3.0 pers/unité
 - modulaire : 2.5 pers/unité

Pipeline de construction (par ville)

- **construction_state** ∈ { idle, waiting_resources, building }
- Champs **pending_*** : ordre courant (unités, surface, demande ressources, durée)
- File FIFO **queued_*** : ordres en attente (pas d'annulation)
- **build_months_remaining** : compteur de temps restant en construction

Cycle de vie / dégradation

- Paramètres : **annual_decay_rate**, **decay_period_cycles**, **decay_land_recovery_fraction**
- Réflexe de dégradation : retire périodiquement une fraction du stock et **libère du foncier** en diminuant **used_buildable_area**.

Note : MiniVille.gaml contient également des variables liées à d'autres blocs (ex : véhicules/transport). Elles ne relèvent pas de l'Urbanisme et ne sont pas détaillées ici.

2.2. Agent urbanism (fichier Urbanism.gaml)

Le bloc Urbanisme est implémenté comme un agent urbanism (parent bloc) qui :

1. crée/instancie les **mini-villes** (à partir d'une couche city)
2. agrège le stock de logements (unités + capacité)
3. calcule la **capacité cible** via un taux d'occupation visé
4. planifie des constructions et alimente le pipeline des **mini-villes**
5. envoie des demandes de ressources (**énergie**, **bois**, **coton**, **surface**) via le producteur

Le bloc utilise un producteur **urban_producer** pour interagir avec le mécanisme commun de production.

3. Dynamique du modèle Urbanisme (à chaque tick)

Hypothèse implicite du code : **1 tick = 1 mois** (durées de construction en mois ; consommation d'énergie "mensuelle").

3.1. Mise à jour des agrégats (stocks + foncier)

Urbanisme récupère la liste des mini-villes **cities** et calcule :

- stock total **units["wood"]**, **units["modular"]**
- capacité totale **total_capacity**
- foncier total construit **surface_used** et foncier restant agrégé **constructible_surface_total**

Les variations "tick" (construction terminée / démolition-dégradation) sont mesurées via delta entre stocks courant vs stock précédent :

- `completed_*_units_tick`, `demolished_*_units_tick`
- `net_units_tick`, `net_capacity_tick`

3.2. Mise à l'échelle “France” via un facteur α (constellation de mini-villes)

Le modèle utilise un facteur `alpha_mv` pour comparer une simulation à N mini-villes simulées à une population nationale.

- `target_pop_per_miniville_real = 10000` personnes/mini-ville “réelle”
- `nb_minivilles_real = ceil(population_real / target_pop_per_miniville_real)`
- `alpha_mv = nb_minivilles_real / nb_minivilles_sim`

Par défaut : `use_dynamic_alpha = false`, donc `alpha_mv` est figé au 1er tick (évite des oscillations si la population varie).

Les indicateurs “comparables au réel” :

- `capacity_real_scaled = total_capacity * alpha_mv`
- `surface_used_scaled = surface_used * alpha_mv`
- `remaining_buildable_scaled = constructible_surface_total * alpha_mv`

3.3. Capacité cible et déclenchement de construction

Paramètres :

- `target_occupancy_rate = 0.95`
- `occupancy_hysteresis = 0.01`
- `build_fraction_of_deficit = 0.25`
- `max_units_per_tick = 2200` (cap sur le nombre d'unités à planifier par tick)
- `max_builds_started_per_tick = 50` (cap sur le nombre de mini-villes qui peuvent entrer en “building” par tick)

Étapes :

1. Capacité cible : `desired_capacity = population_real / target_occupancy_rate`
2. Déficit : `deficit_people = max(0, desired_capacity - capacity_future_effective)`
3. Conversion personnes → unités : via `average_capacity_per_unit()` et un facteur `alpha_mv`
4. Hystérésis : si l'occupation future est déjà sous le seuil ($0.95 - 0.01$), on stoppe la construction.

Répartition fixe des unités planifiées :

- 60% bois / 40% modulaire

3.4. Pipeline : commande → attente ressources → construction → commit

Si déficit et foncier disponible :

1. Urbanisme calcule :

- surface **planned_surface** via **surface_per_unit**
- demande ressources **compute_resource_demand(...)** :
 - bois : "kg wood" = 24000 + "kWh energy" = 7000
 - modulaire : "kg_cotton" = 20000 + "kWh energy" = 8000
 - foncier : "m² land" = **planned_surface**
- durée **compute_build_duration(...)** :
 - bois : 5 mois ; modulaire : 8 mois (pondéré)

2. Urbanisme choisit une ville cible **select_city(cities, planned_surface)**

3. La mini-ville reçoit **set_construction_order(...)** et passe en **waiting_resources**

4. Urbanisme tente ensuite de démarrer :

- vérifie **can_produce()** si possible (diagnostic)
- réserve/consomme via le producteur
- si OK : mini-ville passe en **building** et démarre **build_months_remaining**

5. Quand le compte à rebours finit, la mini-ville :

- ajoute les unités au stock
- met à jour capacité
- consomme du foncier : **used_buildable_area += area_used_now**
- recalcul **remaining_buildable_area**

3.5. Consommation énergétique continue (usage)

En parallèle, Urbanisme agrège l'énergie d'usage mensuelle :

- **wood**: 375 kWh/mois/unité
- **modular**: 20 kWh/mois/unité

Il envoie une demande "**kWh energy**" agrégée au producteur.

Méthodologiquement, cela correspond à la distinction classique "énergie de construction" vs "énergie d'usage" en analyse ACV.

https://prod-basecarbonesolo.ademe-dri.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?chauffage.htm

3.6. Dégradation / libération de foncier (dans mini_ville)

Chaque mini-ville applique périodiquement une dégradation :

- fréquence : **decay_period_cycles** (12 → annuel si tick=mois)
- intensité : **annual_decay_rate** (0.002/an)
- libération foncier : **decay_land_recovery_fraction** (1.0 = foncier totalement récupéré)

Effet : baisse progressive du stock, et **réduction de used_buildable_area**, ce qui redonne du foncier constructible.

4. Paramètres et cohérence des valeurs

4.1. Paramètres logement (modèle)

- Capacité/unité : 3.0 (bois), 2.5 (modulaire)
- Empreinte foncière : **area_per_unit_default = 70 m²** et **modular_surface_factor = 1.15** (modulaire consomme plus de foncier)
- Énergie construction : 7000–8000 kWh/unité (ordre de grandeur simplifié)
- Matériaux : 24 000 kg bois / 20 000 kg coton par unité (hypothèses paramétriques)
- Énergie d'usage : 375 vs 20 kWh/mois/unité (contraste volontaire : “standard” vs “sobriété”)

4.2. Calage national (ordres de grandeur)

Le parc français (~37,6 M logements) et la population (~68 M) justifient un modèle où la capacité totale peut être supérieure à la population réelle selon la distribution.

Les statistiques SDES sur la construction neuve (autorisations / mises en chantier) donnent un repère pour calibrer l'intensité de construction (si nécessaire).

4.3. Remarque importante : facteur de population simulée

Dans **Urbanism.gaml**, la population réelle est calculée comme :

- **population_real = nb_humans * nb_humans_per_agent**
avec **nb_humans_per_agent = 19500.0** dans la version actuelle.

5. Indicateurs produits

Urbanisme permet de suivre :

1. Capacité vs population

- **capacity_real_scaled**
- **occupancy_rate**

2. Construction et pipeline

- **tick_orders_created** (bois/modulaire)

- `completed_units_tick`, `demolished_units_tick`
- parts de villes `idle` / `waiting_resources` / `building`
- `pending_surface_total`, `pending_capacity_total`

3. Foncier

- `surface_used_scaled`
- `remaining_buildable_scaled`
- saturation locale (certaines mini-villes peuvent atteindre `remaining_buildable_area ≈ 0`)

4. Demande de ressources

- `tick_resources_used` (bois, coton, énergie, surface)
- demande énergie d'usage (kWh/tick)

6. Limites et perspectives

Limites

- Logement agrégé : pas de ménages, pas de bâtiments individuels.
- Choix de ville `select_city` : heuristique simple (peut être enrichie).
- Les coûts ressources/énergie sont paramétriques (ordre de grandeur + scénario), pas une ACV complète.
- `alpha_mv` : utile pour comparer à l'échelle France, mais dépend du calibrage (population et mini-villes).

Perspectives

- Stratégies d'allocation plus “micro” (prioriser villes saturées, densification).
- Différencier l'usage énergétique selon typologie/ancienneté.
- Ajouter émissions GES / ACV plus détaillée.
- Politique foncière (protéger des zones, contraintes géographiques fines).

Sources et données utilisées

Les données suivantes ont été utilisées pour contextualiser les ordres de grandeur du parc de logements et de la construction neuve en France, ainsi que pour informer les hypothèses de modélisation :

Parc de logements et statistiques démographiques

1. Parc de logements en France :

Au 1^{er} janvier 2024, la France hors Mayotte compte 38,2 millions de logements.

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/8251576>

Construction neuve et mises en chantier

2. Statistiques des mises en chantier de logements :

En 2024, 178 300 logements collectifs ont été mis en chantier (France hors Mayotte).

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015606>

3. Évolution récente des mises en chantier :

En 2023, 47 200 logements ont été mis en chantier, en forte baisse par rapport aux années précédentes.

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/7936029>

4. Données complémentaires sur l'activité de construction (2025) :

De décembre 2024 à novembre 2025, 378 806 logements ont été autorisés à la construction.

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/construction-de-logements-resultats-fin-novembre-2025-france-entiere>

Données historiques / séries longues

5. Démarrages de logements en moyenne longue :

Les mises en chantier en France ont augmenté à environ 30 000 unités constatées en moyenne sur certaines périodes récentes.

<https://fr.tradingeconomics.com/france/housing-starts>

6. Permis de construire (ordre de grandeur) :

Permis de construire pour logements en France, séries de la banque de données économiques FRED.

<https://fred.stlouisfed.org/series/ODCNPI03FRQ180S>

Sources méthodologiques

7. Description des indicateurs de construction :

Informations sur les définitions statistiques des permis de construire et des logements commencés publiées par l'INSEE.

<https://www.insee.fr/en/metadonnees/source/indicateur/p1627/description>

Répartition du travail

NOM Prénom	Contribution				
PINHO FERNANDES Enzo	Énergie (principal) Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse	Écosystème (secondaire) Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse	Aide rapide sur d'autres secteurs - API - Gitlab		
ÖZGENÇ Doruk	Urbanism(principal) Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse		Démographie/Population (secondaire) Bugfixes		
EKEN Tarik Ege	Démographie / Population (principal) Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse		Urbanism (secondaire) Bugfixes		
ACIKEL Baran	Urbanism(principal) Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code				
DISLI Kaan	Démographie/Population (principal) Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse	Urbanism (secondaire) Bugfixes			
FLEISER Victor	Transport (principal) + Simulations de transport additionnelles Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse				
MARCHAND Thomas	Transport (principal) + Simulations de transport additionnelles Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse				
DELLUC Mélanie	Agriculture(principal) Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse	Energie Problématiques - Diapos pour la présentation			
EL KHOUMSI Safia	Agriculture (principal) Problématiques - Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse	Écosystème (secondaire) Modélisation - directions envisagées - data - code - rapport et analyse	Population Problématiques - Diapos pour la présentation		
IAROCHEN Wissal	Énergie (principal) Conception générale - Problématiques - Modélisation - Orientations - Analyse				
PATAULT Alaric	Énergie (principal) Problématiques - Directions envisagées - Données - Code - Rapport et analyse				

Annexe

Voici les données pour le bloc Transport.

Utilisez de préférence le fichier ods pour une meilleure lisibilité pour voir quelles sources correspondent à quels valeurs, ainsi qu'une comparaison plus facile des valeurs entre les Véhicules. (Le fichier a été testé sur Mac et Windows avec LibreOffice)

Transport : Marche à pied

- **Vitesse** : 4-6 km/h
- **Quantité (nb véhicules en France)** : -
- **Capacité (avg)** : 1
- **Consommation (kWh/km)** : -
- **Durée de vie (mois)** : -
- **Émissions (GES/km)** : $0.039\text{kg} / 2\text{mi} = 12,1 \text{ g/km}$, mais l'humain respire tout le temps donc on ne le compte pas ici
- **Distance max par mois (/km)** : 20/jour en moyenne (randonnée) -> on va dire 3h max pour le déplacement max non absurde (il va probablement changer de moyen de transport avant) $5\text{km/h} * 3\text{h} = 15\text{km}$ $15 * 30 = 90\text{km}$
- **Taux Utilisation Echelle 1** : 0
 - *Justification* : Pas de marche à pieds pour des distances aussi longues
- **Taux Utilisation Echelle 2** : 0.01
 - *Justification* : Déplacements en bordure de mini-villes et entre les autres moyens de transports, ce sont des distances très petites par rapport aux autres moyens de transports (cahier des charges)
- **Taux Utilisation Echelle 3** : 0.2
 - *Justification* : moyen de déplacement pour les courtes distances, donc pour les petits trajets ou pour arriver aux autres moyens de transports. Or la ville est très petite (1km rayon) donc la marche à pieds est très utilisée. De plus c'est le moyen le plus écologique de transport, donc en accord avec les valeurs écotopiques
- **Cout création en Energie (kWh)** : 0
- **Sources** : https://en.wikipedia.org/wiki/Preferred_walking_speed
https://www.globe.gov/explore-science/scientists-blog/archived-posts/sciblog/index.html_p=186.html
<https://www.mon-sejour-en-montagne.com/tutos/combien-de-kilometres-peut-on-marcher-au-maximum-en-une-journee-de-randonnee/#:~:text=En%20moyenne%2C%20un%20randonneur%20mod%C3%A9r%C3%A9ment,atteindre%2035%20%C3%A0%2040%20km.>
<https://mapetiterando.fr/conseils/reflexions/distance-marche-randonnee/>

Transport : Vélo

- **Vitesse** : 15-40 km/h 25-35 km/h -> en prenant une moyenne basse pour les trajets en ville: **25 km/h**
- **Quantité (nb véhicules en France)** : 0,46 vélos par personnes (2023) -> $68,4 * 0,46 = 31M464k$
- **Capacité (avg)** : 1
- **Consommation (kWh/km)** : 0,5 - 2 Wh/km -> **0.001 kWh/km** moy
- **Durée de vie (mois)** : durée de vie électrique: 3-5 ans sans entretien 5-10 ans (vendeur de vélos) En supposant un bon entretien, -> 7 ans (**84 mois**) 1600-4800km, parfois 6500km

- **Émissions (GES/km)** : Mécanique : 0.017kg / 2mi = 5,3 g/km Électrique : 80-150kg CO2, 115kg over lifespan durée de vie 5000km, **23g/km**
 - **Distance max par mois (/km)** : (record du monde: 1000km/jour) On va prendre 30km/jour comme distance max possible comme transport $30 \times 30 = \text{900km}$
 - **Taux Utilisation Echelle 1 : 0**
 - *Justification* : Vélos uniquement dans les mini-villes d'après le cahier des charges
 - **Taux Utilisation Echelle 2 : 0**
 - *Justification* : Vélos uniquement dans les mini-villes d'après le cahier des charges
 - **Taux Utilisation Echelle 3 : 0.4**
 - *Justification* : "L'Écotopien désireux de se rendre à plus de deux rues de son point de départ prend un de ces solides vélos" -> déplacements de longueur moyenne Le vélo est donc,似ilairement à la marche, beaucoup utilisé par les écotopiens, mais il a une plus grande vitesse/distance parcourue, donc il sera un peu plus utilisé par km que la marche
 - **Coût création en Energie (kWh)** : **6.7 kWh** dans l'article pour la formation/soudure des parties, ici c'est du plastique et les parties sont bcp plus simples, donc on peut supposer qu 5 kWh est probablement une simplification raisonnable
 - **Sources** :
 - <https://upway.fr/blogs/news/vitesse-moyenne-velo>
 - https://mint-bikes.com/blogs/infos/guide-vitesse-velo?srsltid=AfmBOoo64ubzv6Xdf881IBjnJkCKxfbSrM_UkLxKT0TEB55ZhsQGkyNn1
 - https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/DGITM_Enquete%20 Nationale%20-%20Usage%20du%20VELO%20-%20Resultats%202023_0.pdf
 - <https://eu.fiido.com/blogs/news/how-much-does-an-electric-bike-consume-per-kilometer>
 - <https://loewi.fr/blogs/infos/quelle-est-la-duree-de-vie-dun-velo-electrique#:~:text=En%20r%C3%A8gle%20g%C3%A9n%C3%A9ralement%20les%20roues,pneus%20peuvent%20influencer%20cette%20dur%C3%A8e>
 - <https://www.ternbicycles.com/fr/explore/choosing-bike/how-long-do-e-bikes-last#:~:text=Si%20vous%20envisagez%20un%20v%C3%A9lo,ans%2C%20parfois%20m%C3%A8s%20plus%20longtemps>
 - <https://upway.fr/blogs/news/duree-de-vie-velo-electrique#:~:text=Ils%20durent%20habituellement%20de%201600,pneus%20en%20les%20entretenant%20correctement>
 - https://www.globe.gov/explore-science/scientists-blog/archived-posts/sciblog/index.html_p=186.html
 - <https://www.arbor.eco/carbon-footprint/electric-bike#:~:text=How%20much%20CO%20emissions%20are,to%20traditional%20bikes%20or%20cars>
 - <https://upway.fr/blogs/news/duree-de-vie-velo-electrique>
 - https://www.reddit.com/r/cycling/comments/wyrob5/whats_the_longest_youve_ridden_without_stopping/
 - <https://research.engineering.ucdavis.edu/greentech/wp-content/uploads/sites/101/2018/06/EBS216Paper.pdf>
-

Transport : Taxis

- **Vitesse** : **50 km/h** en france il y a les routes hors agglomération (80-130kmh) mais on suppose qu'à écotopia ils ne dépassent pas 50kmh car c'est la limite des camions d'après le livre)
- **Quantité (nb véhicules en France)** :

on suppose qu'on prend les taxis+vtc et pas les voitures $56000 \text{ VTC} + 63000 \text{ Taxis} = \text{119000 total}$

On ajoute **+131000** par rapport à la réalité pour répondre à la demande au tick 0, cela ne parait pas trop choquant étant donné le fait que les voitures personnelles ne sont pas présentes dans ecotopia, donc le nombre de taxis serait probablement un peu plus grand

- **Capacité (avg) :** 2. (1.12 dans la source mais ecotopia est plus économe/social donc on peut arrondir à 2)
- **Consommation (kWh/km) :** 136 Wh/km (best), 190 Wh/km (avg) -> **100 Wh/km**
- **Durée de vie (mois) :**

voiture électrique 18,4 ans / 199 849 km (source 1)

8-10 ans / 150 000 km (source 2)

12-18 ans / 200-450k km (source 3)

-> 15 ans / 200k km similaire aux voitures traditionnelles. Mais on va prendre l'âge moyen, plus réaliste: **11,5 ans (138 mois)** directement car âge similaire aux autres voitures

- **Émissions (GES/km) :** 0 Création: 75g/km 103g/km -> **0,1 kg/km**
- **Distance max par mois (/km) :**

60 000km/an en moyenne (5* plus qu'un automobiliste européen moyen), -

certains 300 km/jour régulièrement: $300 \times 365 = 109\,500$ km/an en supposant que le véhicule est utilisé tous les jours.

-> 100000km/an = **~8300 km/mois**

- **Taux Utilisation Echelle 1 : 0**
 - *Justification* : Pas de taxis pour des distances aussi longues
- **Taux Utilisation Echelle 2 : 0.1**
 - *Justification* : Utilisés dans cette échelle pour les déplacements sortant de la ville, moins pour les déplacements entre villes car le train est bien plus efficace pour ce cas. Donc le taux d'utilisation pour un kilomètre est bien plus bas que pour le train
- **Taux Utilisation Echelle 3 : 0.05**
 - *Justification* : On suppose que c'est un moyen de transport relativement peu utilisé pour cette échelle. Cahier des charges : "rarement en taxis"
- **Coût création en Energie (kWh) : 1532 kWh**
- **Sources :** page 60 <https://clg-reeberg-neron.eta.ac-guyane.fr/IMG/pdf/ecotopia.pdf>
<https://www.caradisiac.com/enquete-exclusive-caradisiac-tomtom-aquelle-vitesse-roulent-vraiment-les-francais-190735.htm>
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-taxis-et-vtc-acces-la-profession-offre-de-tranport-equipement-rapport-2025-de-lobservatoire#:~:text=En%202023%2C%20plus%20de%2056.en%20%C3%8Ele%2Dde%2DFrance.>
https://www.institutparisregion.fr/fileadmin/user_upload/Enjeux/pduif/pdf/G1-IAUIdF_FP_Taxis_PDUIF.pdf <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>

https://www.frandroid.com/survoltes/voitures-electriques/2494356_voici-la-duree-de-vie-des-voitures-essence-diesel-et-electrique-le-classement-par-marque

<https://allure-automobile.com/actualites/combien-de-temps-garder-une-voiture>

<https://blog.vivacar.fr/quelle-est-la-duree-de-vie-dune-voiture/>

[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/397-millions-de-voitures-en-circulation-en-france-au-1er-janvier-2025#:~:text=En%20d%C3%A9pit%20d'une%20baisse,\(11%2C1%20ans\).](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/397-millions-de-voitures-en-circulation-en-france-au-1er-janvier-2025#:~:text=En%20d%C3%A9pit%20d'une%20baisse,(11%2C1%20ans).)

<https://www.transportenvironment.org/articles/how-clean-are-electric-cars>

[https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-des-transports#:~:text=%2C7%20%25\).-,Zoom%20sur%20les%20autobus%20et%20autocars,total%20du%20secteur%20des%20transports.](https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-des-transports#:~:text=%2C7%20%25).-,Zoom%20sur%20les%20autobus%20et%20autocars,total%20du%20secteur%20des%20transports.)

<https://www.journaldunet.com/mobilites/1494709-la-constante-evolution-des-vtc-et-des-taxis/#:~:text=C>

<https://publications.anl.gov/anlpubs/2010/10/68288.pdf> table 6

Transport : Minibus

- **Vitesse : < 15 km/h**
 - **Quantité (nb véhicules en France) : 66000 autocars + 28000 autobus = 94000 total**
 - **Capacité (avg) : mini bus : 8 à 20 places taux de remplissage moyen 35% -> $16 \times 0.35 = 5.6 \approx 6$**
 - **Consommation (kWh/km) : 0.33 kWh/km, max 22 pers.**
 - **Durée de vie (mois) : basé sur l'age moyen: 8,2 ans (98 mois) (1600-2000 neufs par an en France)**
 - **Émissions (GES/km) : 0** Création: On prend une valeur entre les voitures et un grand camion: **0,5 kg/km**
 - **Distance max par mois (/km) : 5h45-0h45: 19h/jour, 15km/h: $15 \times 19 \times 30 = 8550$ km avg 38570 km/an, 3214 /mois En prenant un milieu pour l'heure de pointe: **5000km****
 - **Taux Utilisation Echelle 1 : 0**
 - *Justification* : Minibus uniquement dans les mini-villes (Cahier des charges)
 - **Taux Utilisation Echelle 2 : 0**
 - *Justification* : Minibus uniquement dans les mini-villes (Cahier des charges)
 - **Taux Utilisation Echelle 3 : 0.35**
 - *Justification* : Le minibus est plus adapté pour les déplacements longs (un peu trop longs pour le vélo) ou si la personne porte des choses, mais on a décidé de le mettre moins haut en utilisation que les vélos car les mini villes ne sont pas très grandes (1km rayon) donc les longs trajets ne peuvent jamais être très longs.
 - **Cout création en Energie (kWh) : $1532 \times 3 = 4596 \text{ kWh}$** On considère qu'un minibus est à peu près 3 fois plus lourds que un taxi, donc on multiplie la valeur pour les taxis par 3 (la valeur de l'article est pour un véhicule générique de 1500 kg donc cette nouvelle estimation semble raisonnable)
 - **Sources :** page 36 <https://clg-reeberg-neron.eta.ac-guyane.fr/IMG/pdf/ecotopia.pdf>
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/66-600-autocars-et-28-000-autobus-en-circulation-au-1er-janvier-2025#:~:text=Au%201er%20janvier%202025%2C%2066,d'une%20motorisation%20diesel%20thermique>. <https://www.centreautocar.com/guides/combien-places-autobus-autocar>
<https://www.centreautocar.com/guides/differences-bus-autocar>
<https://dewesoft.com/blog/evaluating-energy-consumption-of-electric-minibus>
<https://www.transbus.org/actualite/actu-2025-06-repartition-exploitation-autobus.html> électrique
<https://www.bonjour-ratp.fr/horaires-bus/>
<https://www.banquedesterritoires.fr/autobus-et-autocars-plus-de-trois-milliards-de-kilometres-au-compteur-en-2011> (idem) <https://publications.anl.gov/anlpubs/2010/10/68288.pdf> table 6
-

Transport : Camions

- **Vitesse : <= 50 km/h**
- **Quantité (nb véhicules en France) : 601040 (2021) 624938 (2025) -> 625k**
- **Capacité (avg) : 12000kg**
- **Consommation (kWh/km) : 0.96 kWh/km 11 to 18t, +0.18 kWh/km per +10t -> ~1 kWh/km**
- **Durée de vie (mois) : basé sur l'age moyen sur route:**

$$(11,4 \times 48,9) + (5,7 \times 36,3) + (11,4 \times 17,7) / 100 = 9,67 \text{ ans (116 mois)}$$

- **Émissions (GES/km)** : 0 Crédit: hyp: produit 10x plus pendant la construction (consomme 10x la voiture en électricité); **1kg/km**
 - **Distance max par mois (/km)** : 2024: 42100/an en moyenne (ensemble des poids lourds (VASP, camions, tracteurs routiers)). +haut en heure de pointe, mais avec la vitesse limitée à 50 dans Ecotopia, on garde cette valeur (se discute) -> **3508 km/mois**
 - **Taux Utilisation Echelle 1 : 1**
 - *Justification* : Seul véhicule utilisé pour le transport de matériaux
 - **Taux Utilisation Echelle 2 : 1**
 - *Justification* : Seul véhicule utilisé pour le transport de matériaux
 - **Taux Utilisation Echelle 3 : 1**
 - *Justification* : Seul véhicule utilisé pour le transport de matériaux
 - **Coût création en Energie (kWh)** : $1532 \times 3 = 4596 \text{ kWh}$ Même raisonnement que pour le minibus
 - **Sources** : page 60 <https://clg-reeberg-neron.eta.ac-guyane.fr/IMG/pdf/ecotopia.pdf>
<https://www.acea.auto/files/report-vehicles-in-use-europe-january-2021-1.pdf>
https://www.acea.auto/files/ACEA_Report_-_Vehicles_on_European_roads_2025.pdf
<https://www.scania.com/fr/fr/home/products/attributes/electrification/e-mobility-hub/all-you-need-to-know-about-range-and-payload-for-electric-trucks.html>
<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Real-world-data-analysis-of-battery-electric-trucks.pdf>
<https://espace-adherents.fntr.fr/sites/default/files/2024-10/Parc%20poids%20lourds%20en%20France%20au%202024.pdf> électrique
[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/621-500-poids-lourds-en-circulation-au-1er-janvier-2025#:~:text=Ce%20parc%20s%C3%A9tablit%20au.parc%20\(48%2C9%20%25\). \(idem\)](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/621-500-poids-lourds-en-circulation-au-1er-janvier-2025#:~:text=Ce%20parc%20s%C3%A9tablit%20au.parc%20(48%2C9%20%25).%20(idem))
<https://publications.anl.gov/anlpubs/2010/10/68288.pdf> table 6
-

Transport : Train

- **Vitesse** : livre: 360 km/h (plat) / 150 km/h (non plat) réalité: 320 km/h croisière -> **200 km/h moy**
- **Quantité (nb véhicules en France)** : 2023: Le parc: **4000+** véhicules moteurs (automoteurs et locomotives).

Le parc ferroviaire "en service": 6300+ éléments (61% automoteurs, 6% locomotives, 33% voitures).

TER : 3146 éléments. Transilien & RER : 1494 éléments. Intercités : 1254 éléments. TGV (SNCF Voyageurs) : Plus de 360 rames (en baisse par rapport aux 400 de 2019). Ces valeurs baissent, mais on ne va pas la baisser car il n'y a pas de voitures en Ecotopia, on peut revoir selon les résultats / d'où on part -> 4400 On ajoute +8600 par rapport à la réalité pour répondre à la demande au tick 0, Ecotopia à beaucoup plus besoins de trains que la France réelle vu que l'intégralité des longs trajets se fait en train au lieu d'avoir une majorité en voiture, donc ça ne paraît pas choquant d'augmenter le nombre de trains disponibles

- **Capacité (avg)** : **258 avg**: 2024 France: taux d'occupation: 77% TGV, 35% TER etc, 34% RER etc fréquentation: 67Md TGV + 27Md TER etc + 19Md RER (113Md passagers), 32Md fret moyenne taux d'occupation passagers: 113Md / 220Md = 51,4% Capacité par catégorie : SLO Domestiques : TGV Duplex : 510, OUIGO : 634 | avg 560 SLO Internationaux : TGV POS (Lyria) : 377, Eurostar e320 : 894 | avg 550 Interurbains G.L : Coradia Liner (Régiolis) : 270, Rame Corail 10wag: ~750 | avg 500 Interurbains Proximité : X 73500 : 80, Régiolis : 220-350 | avg 160 (bcp de petits trains fréquents) Franciliens RER : RER NG (Z 58000) : 1563, MI09 (RER A) : 2600 | avg 2200 (transport de masse) Franciliens Trains : Tram-train (Dualis) : 250, Francilien (Z 50000) : 944 | avg 900 AVG total: ~501 places. Donc en moyenne 258 places capacité avg: 600 tonnes par train some data: EU28 (2015):

6500 billion pkm 3300 billion tkm 9% rail modal share of total transport Japan (2015): 1300 billion pkm 400 billion tkm 24% rail modal share of total transport

- **Consommation (kWh/km)** : 88.2 Wh/p-km (source 1) $(88.2258)/1000 = 22,8 \text{ kWh/km}$ (*valeur plus complète plus bas*) en tonne, à peu près la moitié (source 2): 44 Wh/t-km World (2015): (38.8% electrified) 130 kJ/pkm, 140 kJ/tkm EU28 (2015): (62% electrified) 360 kJ/pkm, 170 kJ/tkm (67.6% energy: electric) Japan (2015): (65% electrified) 150 kJ/pkm, 150 kJ/tkm (89.8% energy: electric) Converted: World (2015): 36 Wh/pkm, 39 Wh/tkm EU28 (2015): 100 Wh/pkm, 47 Wh/tkm Japan (2015): 42 Wh/pkm, Wh kJ/tkm Electric: 90% energy efficient compared to diesel (30-40%) 55% en France d'après Wikipedia, mais les réseaux les plus électrifiés sont plus fréquentés, donc on suppose 70% -> $100 = (3x(1-0,62)) + (x0,62) x = 58 \text{ Wh/pkm}$ $(58258)/1000 = 15,0 \text{ kWh/km}$
- **Durée de vie (mois)** : age moy: presque 27 ans: TGV (TAGV) : 15,6 ans Transilien & RER : 19,6 ans TER : 24,4 ans Intercités : 42,9 ans Autres services librement organisés (SLO) : 44,8 ans On peut supposer que les remplacements font partie de la durée de vie, donc on peut prendre ces valeurs directement: **27 ans (324 mois)**
- **Émissions (GES/km)** : CO2: 0 en général Si pas électrique World (2015): 18 g/pkm , 14 g/tkm EU28 (2015): 28 g/pkm , 16 g/tkm Japan (2015): 23 g/pkm , 27g/tkm on peut supposer que la construction n'émet pas plus (pas de batteries à bord contrairement aux voitures électriques): EU28: **7,2 kg/km** (personnes), 9,6 kg/km (fret)
- **Distance max par mois (/km)** : TGV: moyenne 480000 km/an (40000 km/mois) 5h30-1h20: 19.87h/jour (si on suppose qu'ils roulent que 1/2 du temps par train: 9,94h) 200km/h (avg) en prenant en compte les arrêts: 20019,8730 119220 km (grand max où tous les trains roulent pendant toute la journée, ce qui est rarement le cas) Si on prend un entre deux 40k-120k: **80k km/mois**
- **Taux Utilisation Echelle 1 : 1**
 - *Justification* : Seul véhicule utilisé pour cette échelle pour le transport de passagers, car il serait moins efficace de voyager autrement pour de telles distances, et les écotoiens tiennent à une utilisation efficace des ressources.
- **Taux Utilisation Echelle 2 : 0.89**
 - *Justification* : Déplacement entre les mini villes et au sein de la région plus généralement, donc il couvre des longues distances (ex >50km). C'est pourquoi il est tellement supérieur au taxis.
- **Taux Utilisation Echelle 3 : 0**
 - *Justification* : Déplacement entre les mini villes mais pas AU SEIN d'une mini ville
- **Cout création en Energie (kWh)** : Poids: Un train d'environ 500 places (proche de la moyenne trouvée précédemment): environ 400 t. Le plastique est 7x(fer) 3x(aluminium) moins lourd mais on suppose qu'il doit être plus épais pour supporter, donc on dit 200t de plastique Composition train (car souvent le coût énergétique vient d'ici): principalement le corps (plastique) Pour du nouveau plastique: 45MJ/kg Recyclage = -75 à 88% d'énergie en moins d'après source (on prend 85%) -> 6,75 MJ/kg = 1,875 kWh/kg $1,875*400000/2= 375000 \text{ kWh}$
- **Sources** : page 31 <https://clg-reeberg-neron.eta.ac-guyane.fr/IMG/pdf/ecotopia.pdf> [https://fr.wikipedia.org/wiki/TGV#:~:text=De%20conception%20fran%C3%A7aise%2C%20elles%20sont,grande%20vitesse%20\(LGV\)%20parcourues.](https://fr.wikipedia.org/wiki/TGV#:~:text=De%20conception%20fran%C3%A7aise%2C%20elles%20sont,grande%20vitesse%20(LGV)%20parcourues.) https://autorite-transports.fr/wp-content/uploads/2025/01/bilan_ferroviaire_2023_essentiel-1.pdf https://uic.org/IMG/pdf/handbook_iea-uic_2017_web3.pdf https://www.autorite-transports.fr/wp-content/uploads/2025/06/bilan-ferroviaire-france-2024_plaquette-a-mi-annee.pdf https://fr.wikipedia.org/wiki/TGV_Duplex <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ouigo> https://fr.wikipedia.org/wiki/Eurostar_e320 <https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9giolis> https://fr.wikipedia.org/wiki/Regio_2N https://fr.wikipedia.org/wiki/Z_50000 https://fr.wikipedia.org/wiki/Z_58000 / Z 58500 https://fr.wikipedia.org/wiki/TGV_POS https://fr.wikipedia.org/wiki/X_73500 https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_Corail https://fr.wikipedia.org/wiki/MI_09 https://fr.wikipedia.org/wiki/Alstom_Citadis_Dualis <https://topsectorlogistiek.nl/wp-content/uploads/2018/04/20180318-Emissions-of-railtransport-Topsector-Logistics.pdf> https://uic.org/IMG/pdf/handbook_iea-uic_2017_web3.pdf <https://mikurainternational.com/electric-vs-diesel-locomotives-energy-efficiency-face-off/>

<https://www.renfe.com/es/fr/groupe-renfe/transport-durable/efficacite-energetique>
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrification_du_r%C3%A9seau_ferroviaire_en_France#:~:text=6.1%20Articles%20connexes-,Le%20r%C3%A9seau%20aujourd'hui,kilom%C3%A8tres%20par%20d'autres%20syst%C3%A8mes.
https://autorite-transports.fr/wp-content/uploads/2025/01/bilan_ferroviaire_2023_essentiel-1.pdf
électrique https://uic.org/IMG/pdf/handbook_iea-uic_2017_web3.pdf
<https://www.bonjour-ratp.fr/horaires-rer/>
<https://www.planetoscope.com/Mobilite/1608-distance-moyenne-parcourue-par-un-tgv-en-france.html#:~:text=Un%20TGV%20de%20la%20SNCF,480%20000%20kilom%C3%A8tres%20par%20an.>
http://www.lmm.jussieu.fr/~lagree/DIVERS/klasse_de_mer/a_inklure/tanguyTGV/tgv.html
<https://citoyens.citeo.com/wp-content/uploads/2025/01/Du-Petrole-Au-Plastique.pdf>
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/energie.aspx?Type=Chapitre&numero=3#:~:text=%C3%89nergies%20calorifique%2C%20%C3%A9lectrique%2C%20radiative%20et%20chimique&text=La%20combustion%20de%201%20kg.%20et%20de%20l'air%20respir%C3%A9.>
<https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/combien-produit-denergie-partenir-des-dechets-en-france> https://resolutions.unep.org/resolutions/uploads/apr_15082023_b_0.pdf
<https://railway-news.com/products-services/train-body-shells-structural-parts/#:~:text=Train%20body%20shells%20and%20structural,as%20aluminium%20or%20stainless%20steel.>

Notes additionnelles et Autres sources

- **Notes additionnelles :** Les valeurs actuelles pour les taux d'utilisations sont fortement incompatibles avec les taux qui seraient utilisé dans Ecotopia. En effet actuellement il y a un très fort réseaux routier qui est fortement exploité avec 63-73% des trajets effectués en voiture (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-locale-et-longue-distance-des-francs-enquete-nationale-sur-la-mobilite-des-0?rubrique=&dossier=1345>). Effectuer la majorité des trajets en voitures individuelles n'est pas du tout en accord avec les principes de la société Ecotopia. On a donc jugé que les statistiques actuelles des taux d'utilisation ne sont donc pas exploitables vu que les comportements sont tellement différents. C'est pourquoi nous avons créé nos propres taux d'utilisation des véhicules basé sur notre compréhension/suppositions de l'utilisations des transports par les écotoiens
- **Note Echelle 1 :** à cette échelle on a considéré uniquement l'utilisation des trains pour les humains, les autres véhicules ne sont pas du tout adapté/efficaces pour des trajets si longs d'après l'infrastructure routière disponible et la consommation. Pour le reste du déplacement (premiers et derniers kilomètres), ils semblent insignifiant par rapport au trajet entier
- **Note Echelle 2 :** A cette échelle le déplacement est séparé principalement entre le train et le taxi pour les déplacements humains. Nous avons choisi de dire que l'utilisation du train est de loin le plus grand taux car il couvre les longues distances (ex + 50km) bien plus efficacement que les taxis, et il est également très disponible (centre de toutes les mini villes) donc il sera choisi pour la plupart des longs trajets, alors que les taxis seront utilisés pour les trajets relativement courts qui sortent de la ville (quelques km). On a aussi mit une petite partie de marche à pieds pour les déplacements restant hors/entre les véhicules
- **Note Echelle 3 :** Si on teste ces taux sur taux pour 1km moyen de trajet on a : - 200 m de marche (petits trajets + déplacement entre les autres véhicules ex vélo, minibus...) - 400 m Vélo (pour les trajets de distance moyenne, un peu trop long pour la marche, mais un peu trop court pour les autres véhicules) - 350 m de minibus, utilisés pour les trajets plus longs, donc il a un taux d'utilisation supérieur à la marche, mais inférieur au vélo car la ville ne fait que 1km de rayon, donc les trajets les plus longs restent relativement courts, donc on pense que les vélos resteraient plus préférés. - 50 m de taxi, les taxis ne semblent pas être la manière la plus efficace pour cette échelle (plutôt échelle 2) donc

on a gardé un taux d'utilisation moyen relativement faible pour cette échelle. Dans le cahier des charges il est également mentionné que les taxis sont rarement utilisés à l'intérieur des mini villes

- **Note Cout création :** En Ecotopia il y a un recyclage très important (presque 100% efficacité). D'où pour la version MACRO nous avons décidé de modéliser la fabrication des véhicules uniquement par une consommation en énergie initiale. Pour les valeurs utilisées nous avons cherché les couts en électricité pour l'assemblage/création des parties pour les véhicules et utilisé ces valeurs. En écotopia les parties sont simples et faites de matériaux basiques principalement, donc leurs création paraît assez simple. Trouver des valeurs pour exactement cet aspect dans la création de véhicules réels est difficile donc nous espérons que cette estimation devrait être suffisamment proche des valeurs idéales.
Réflexion sur l'importance de la précision de ces valeurs : Le recyclage est super efficace donc la consommation électrique mensuelle sera bien plus grande que celle de création, donc ce n'est pas grave si la consommation de la création n'est pas exacte correcte quand on compare les valeurs à l'utilisation du véhicule sur toute sa durée de vie
- **Autre sources utiles :**
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-locale-et-longue-distance-des-français-enquête-nationale-sur-la-mobilite-des-0?rubrique=&dossier=1345> voyages français : distances, nombres, véhicules...

Déplacements population

Informations Générales / Contenu Source

- **Hypothèses principales :** Les Ecotopiens ont beaucoup de temps libre grâce aux 20h de travail hebdomadaire, donc on suppose qu'ils ont 1 activité de loisir par jour, soit 1 aller + 1 retour (cf % des types de loisirs plus loin dans le tableau) On suppose qu'ils ont 7.3 déplacements professionnels/scolaire par semaine en moyenne (aller+retour) (cf nombre de trajets professionnels par jours plus loin dans le tableau) Et on ajoute 0.5 déplacement divers (aller+retour) par jour pour prendre en compte les achats, accompagnement d'enfants, soins, administratif...
- **Informations trouvées (Statistiques) :**
 - "les Français réalisent trois déplacements (dans un rayon de 80 km autour de leur domicile) par jour en semaine."
 - "LES PERSONNES EN EMPLOI EFFECTUENT CHAQUE SEMAINE 7,3 TRAJETS VERS OU DEPUIS LEUR LIEU DE TRAVAIL HABITUEL"
 - "les personnes en emploi réalisent en moyenne deux déplacements professionnels par semaine hors de leur lieu de travail habituel et 1,1 voyage professionnel par an"
 - les déplacements pour le travail ont une durée en moyenne inférieure à une heure (sinon, l'individu cherche un travail plus proche)
 - les individus peuvent faire des déplacements plus longs une fois par semaine (pour travail, loisirs, vacances ou autre) avec une certaine probabilité, n'importe où en France
 - 1 voyage sur 5 se fait à + de 500 km du domicile
- **Règles définies :** On définit les règles suivantes pour le choix des destinations de loisirs : — 50% des loisirs se feront dans un espace naturel accessible : point d'eau (lac, rivière, mer...), forêt, montagne. Par défaut, si aucune de ces zones n'est accessible à proximité (< 2h de trajet), on choisira une

destination en extérieur en dehors de la mini-ville de résidence. — 30% auront lieu en extérieur dans leur mini-ville de résidence ou en bordure de celle-ci. — Les 20% restants resteront à leur domicile.

- **Notes :**

- -> 7.3 trajets professionnels habituels, on suppose que ils sont dans la mini ville ou en bordure, les voyages professionnels à l'échelle 2 sont pris en compte par la colonne suivante
- Les Ecotopiens ont beaucoup de temps libre grâce aux 20h de travail par semaine, donc on suppose qu'ils ont 1 activité de loisir par jour (aller+retour)

-

- **Sources :**

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-locale-et-longue-distance-des-francs-enquete-nationale-sur-la-mobilite-des-0?rubrique=&dossier=1345>

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7313/download?inline>

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7313/download?inline> Cahier des charges Cahier des charges Cahier des charges

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/6336/download?inline>

<https://www.ecov.fr/article/ce-que-nous-dit-lanalyse-des-flux-physiques-de-la-mobilite/>

Distance parcourue par mois par habitant à l'échelle 1

- **Distance (en Km) / Calcul :** $(0.09 + 4) \text{ trajets} \times 400 \text{ km distance} \rightarrow 1636 \text{ km}$
 - **Justifications :** Distance moyenne par trajet : 400 km, la France est approximativement un hexagone de taille 1000 par 1000 kilomètres, on peut considérer comme distance moyenne le rayon (400km) pour un déplacement aléatoire
 - **Informations trouvées :**
 - 1.1 voyage professionnel par an $\rightarrow 1.1/12 \text{ mois} = 0.09 \text{ voyages par tick}$
 - 1 fois par semaine $\rightarrow 1 \times 4 \text{ semaines} = 4 \text{ voyages par ticks}$
-

Distance parcourue par mois par habitant à l'échelle 2

- **Distance (en Km) / Calcul :** $(8 + 30) \text{ trajets} \times 40 \text{ km distance} \rightarrow 1520 \text{ km}$
 - **Justifications :** Beaucoup de déplacements à cette échelle sont pour aller dans des endroits hors de la ville relativement proches localement, donc on peut considérer une distance approximative de 40km pour le déplacement moyen à cette échelle
 - **Informations trouvées :**
 - 2 déplacements professionnels par semaine hors du lieu de travail habituel $\rightarrow 2 \times 4 \text{ semaines} = 8 \text{ déplacements par tick}$
 - 50% des loisirs dans un espace naturel accessible $\rightarrow 2 \times 30 \text{ jours} \times 0.5 = 30 \text{ trajets pour loisirs par tick}$
-

Distance parcourue par mois par habitant à l'échelle 3

- **Distance (en Km) / Calcul :** $(29.2 + 18) \text{ trajets} \times 1 \text{ km distance} \rightarrow 47.2 \text{ km}$

- **Justifications :** Distance moyenne par trajet : 1 km, les mini villes font 1km de rayon (et un peu plus en prenant en compte les bordures de la ville), un déplacement aléatoire dans la ville correspond donc approximativement à une distance de 1km
- **Informations trouvées :**
 - -> 7.3×4 semaines = 29.2 trajets par tick
 - 30% des loisirs dans la mini-ville / bordure -> 2×30 jours * 0.3 = 18 trajets pour loisirs par tick