

RENDU MODÈLE MICROSCOPIQUE

Projet MOSIMA

Equipe :

Maxence MAIRE
Loona MACABRE
Nassim AHMED ALI
Nacer BERRADA
Marc BUISSON
Jules CASSAN

Encadrants :

Jean-Daniel KANT

Cédric HERPSON

Maël FRANCESCHETTI

Tristan BERSOUX



Sommaire

1	<u>Introduction</u>	3
2	<u>Bloc Énergie</u>	4
2.1	Introduction	4
2.2	Impact saisonnier	4
2.3	Pertes et rendements	6
2.4	Transition énergétique	7
2.5	Conclusion	9
2.6	Nouveau modèle	9
3	<u>Bloc Alimentation</u>	10
3.1	Modélisation	10
3.1.1	Régime alimentaire / profils de consommation	10
3.1.2	Manque de nourriture et carences	10
3.1.3	Recyclage des déchets et composte	11
3.1.4	Production adaptative	11
3.1.5	Initialisation des données	11
3.2	Interactions avec les blocs extérieurs	13
3.3	Matrice EM	13
3.4	Expérimentation - Analyse de données	13
4	<u>Bloc Transport</u>	16
4.1	Etat de la société dans la modélisation	16
4.1.1	Présentation générale	16
4.1.2	Choix de modélisation	16
4.1.3	Dépendance aux ressources des autres blocs	19
4.1.4	Rendu visuel du bloc transport	19
4.2	Production et consommation	20
4.3	Résultats du modèle	21
4.3.1	Analyse des résultats	21
4.3.2	Transition du modèle	22
4.3.3	Conclusion	24
5	<u>Bloc Urbanisme</u>	25
5.1	Modélisation et choix	25
5.1.1	Comment calcule-t-on le coût de nos bâtiments en bois?	26
5.1.2	Données de consommation énergétique	26
5.2	Interactions	27
5.2.1	Bloc démographique	27
5.2.2	Bloc Territoire, agriculture et énergie	27

5.2.3	Bloc Transport	27
5.2.4	Tous les blocs	28
5.3	Expérimentation	28
5.3.1	Évolution du travail selon le ratio maison/immeuble	28
6	<u>Conclusion</u>	31
6.1	Perspectives et Améliorations	31
6.1.1	Bloc Agriculture	31
6.1.2	Bloc urbanisme	31
6.1.3	Bloc transport	31
A	Annexe	33

1 Introduction

Ce rapport a pour objectif de présenter et analyser notre modèle microscopique dans le cadre du projet Ecotopia, visant à estimer si la France d'aujourd'hui est compatible avec le mode de vie radicalement éco-responsable des écotopiens. Nous reviendrons sur les éléments du modèle macroscopique que nous avons affinés ou complètement repensés, et présenterons en détail les nouveautés de notre modèle.

Pour chaque bloc, nous nous sommes mis d'accord sur les questions que nous souhaitons aborder et quelles simulations seraient les plus appropriées pour y répondre. En particulier, nous avons implémenté notre modèle de sorte qu'on puisse observer une transition entre un comportement français actuel et l'idée qu'on se fait d'un comportement écotopien en matière d'habitudes alimentaires, d'émissions de CO₂, d'utilisation de transports... Nous avons également focalisé notre attention sur le calcul de la matrice EM pour calculer les indicateurs attendus à l'issue de nos expérimentations sur le modèle. Celle-ci se trouve en annexe.

2 Bloc Énergie

2.1 Introduction

Le modèle macro a révélé que la capacité de production énergétique française permet de répondre aux besoins du système écotopien. Dans la continuité du modèle macro, le modèle micro a pour objectif d'affiner le modèle et de mettre en évidence les interactions entre les différents blocs.

Pour transiter vers un modèle micro, l'exercice pour le bloc énergétique a été de questionner la solidité du système dans des mises en situation. Ces mises en situation ont permis de repenser la structure du modèle.

2.2 Impact saisonnier

Si l'on considère les changements de saison, comment varie la consommation d'un type de ressource par mois ?

Un des objectifs du modèle micro est d'observer les interactions entre les différentes sources de production énergétique. Pour ce faire on intègre au système des facteurs saisonniers et on observe comment les énergies se compensent entre elles, en période d'été ou en période d'hiver. En période d'hiver, l'ensoleillement du territoire diminue, la capacité de production énergétique solaire avec. À cause de tempêtes sur terre ou en mer les centrales éoliennes sont arrêtées sur des durées variables. La capacité de production du bloc solaire et éolien diminue en hiver. On se pose alors la question, si on considère des facteurs saisonniers, comment est-ce que les énergies vont se compenser ? Est-ce que l'énergie nucléaire est une solution viable pour compenser d'autres sources et répondre aux besoins écotopiens ?

Pour répondre à cette question on ajoute des paramètres saisonniers à la simulation :

- Mixte énergétique en été
- Mixte énergétique en hiver

Voici les variations données :

saison	solaire	éolien	hydro	nucléaire
été	0.5	0.15	0.05	0.3
hiver	0.2	0.1	0.1	0.6

La consommation énergétique est de $8 \cdot 10^9$ kWh par mois ce qui est l'équivalent de 8TWh par mois et donc 96 TWh par ans.

Dans la simulation on considère deux saisons, hiver (6 premiers mois), été (les 6 derniers mois). Durant les deux saisons les différents producteurs d'énergie réus-

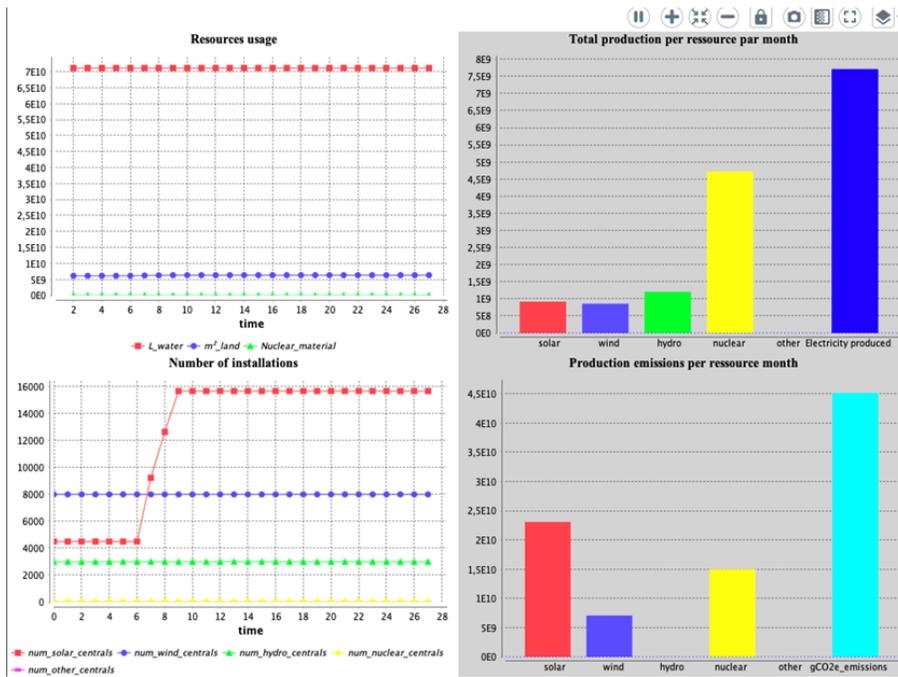


FIGURE 1 – Mix énergétique Hiver

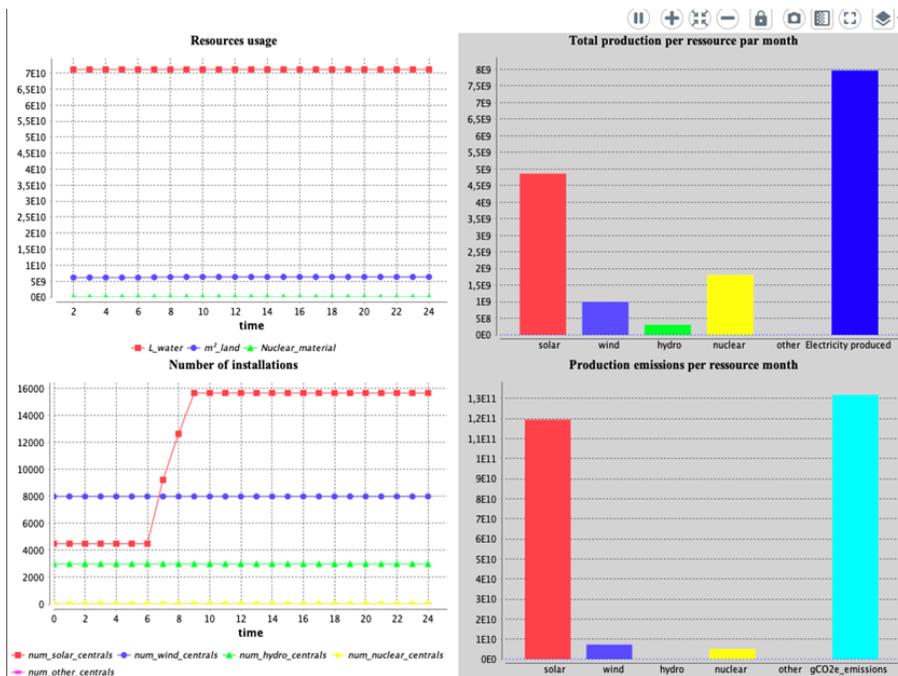


FIGURE 2 – Mix énergétique Été

sisent à répondre à la demande écotopienne.

Lors de la partie hivernal, la production énergétique est :

Saison	Solaire	Eolien	Hydro	Nucléaire
été	0.9 TWh	0.8 TWh	1.2 TWh	5.1 TWh
hiver	4.8 TWh	1 TWh	0.3 TWh	1.9 TWh

On observe aussi une hausse de la quantité d'émission de CO₂, on passe de $4.10 * 10^{10}$ gCO₂ par mois à $1.2 * 10^{11}$ gCO₂ par mois.

En million de tonne :

— Émission de CO₂ en hiver : 0.04Mt

— Émission de CO₂ en été : 0.12 Mt

En comparaison d'après le site <https://www.iea.org/countries/france>, la France à émis 260.542 Mt de CO₂ en 2020. On en conclut qu'il existe un mixte énergétique, qui prend en considération les facteurs saisonnier, et qui permet de subvenir au besoin écotopien. On en conclut aussi qu'il est possible de compenser les déficits d'une source de production.

2.3 Pertes et rendements

Dans la suite on cherche à exercer plus de pression sur le système. D'après le modèle macro on sait que les ressource énergétique française actuel sont suffisantes pour répondre à la demande écotopienne. On sait aussi que le capacité de production est suffisante pour s'adapter au changement de saison.

Si on considère les perte énergétique du trajet source destination et les rendements des différentes centrales, est-ce que le modèle pourra le supporter et répondre à la demande? Dans le cadre du projet le bloc énergie s'est intéressé à la production primaire et à la production finale. Est-ce que les différents groupes énergétiques sont capable de se compenser et de répondre à la demande énergétique ?

Voici les données si l'on perd 10% sur un trajet, et que l'on prend en compte le rendement habituel d'une centrale, pour que l'utilisateur final ai accès à 1 kWh :

Énergie	Rendement	Énergie nécessaire pour produire 1 kWh
solaire	20%	5.56 kWh
éolienne	40%	2.78 kWh
hydroélectrique	85%	1.32 kWh
nucléaire	35%	3.17 kWh

Dans la suite l'énergie requise sera appelé facteur de perte. Le facteur de perte de l'énergie généré à partir du nucléaire est 3.17, pour le solaire le facteur de perte

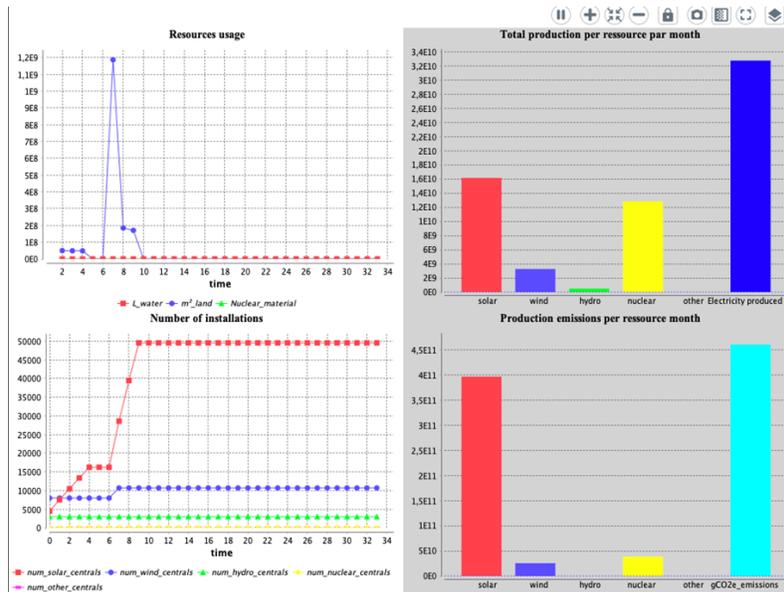


FIGURE 3 – Simulation électrique en été au bout de 34 mois

est de 5.56.

2.4 Transition énergétique

En se basant sur les graphes de production avant après, on remarque la ressource solaire avec les installations actuelles françaises est insuffisante. Il faut ajouter plus de 45 000 centrales pour atteindre 50 000 centrales ce qui représente une superficie de 935 Km².

Durant les six premiers mois, période hivernale, il y a une augmentation du nombre de centrales solaires. On passe de 5 000 à 15 000 centrales afin que le solaire puisse répondre à la demande à hauteur de 20 %.

Au début de l'été, avec l'évolution du mix énergétique, on observe une augmentation du nombre de centrales éoliennes et de centrales solaires. On passe de 5 000 à 15 000, puis à 50 000 centrales solaires, pour que l'énergie solaire puisse représenter 50 % de la production estivale. On passe de 8 000 à 11 000 éoliennes pour que la ressource éolienne puisse subvenir à 15 % de la demande énergétique.

Seconde observation : La production énergétique fluctue beaucoup entre l'été et l'hiver. C'est évident car certaines ressources sont moins efficaces selon certaines saisons.

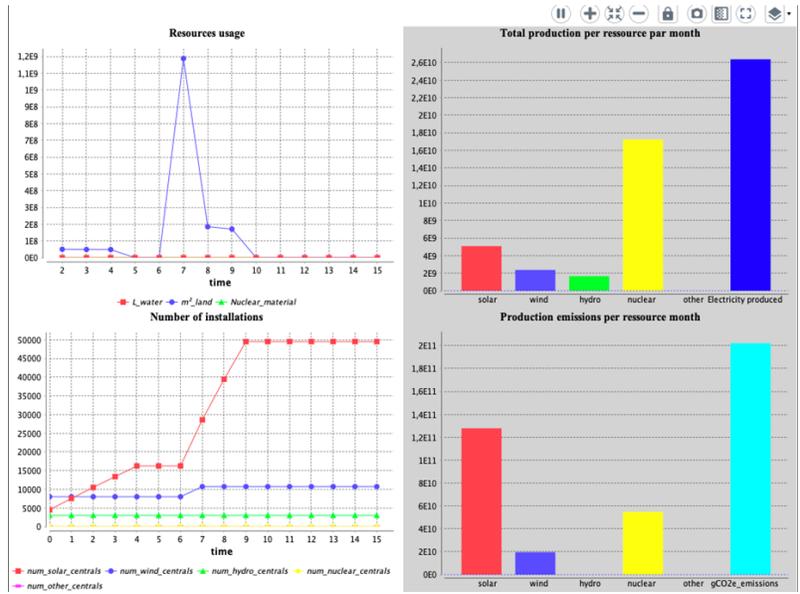


FIGURE 4 – Simulation électrique en Avril au bout de 15 mois

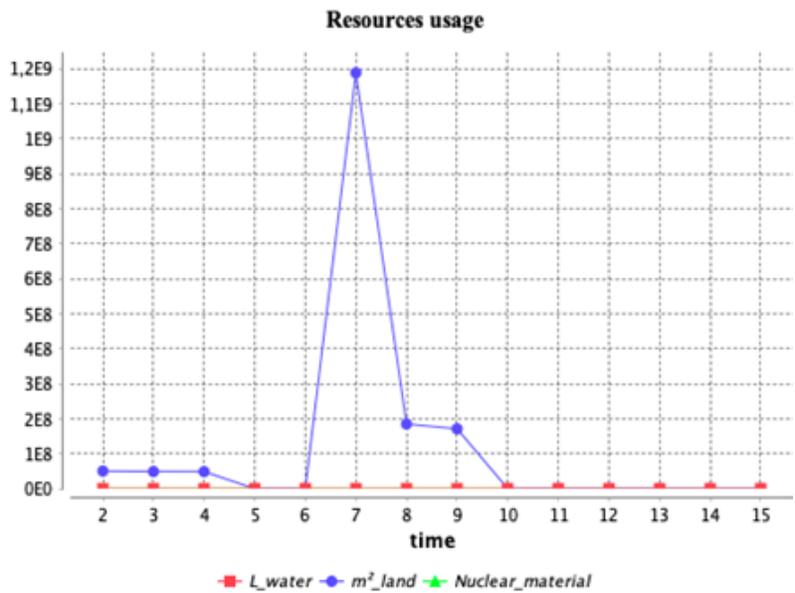


FIGURE 5 – Zoom sur la période de transition

2.5 Conclusion

En prenant en compte les rendements des différents types d'énergie, les pertes de transport et les facteur météorologique, le territoire français possède suffisamment de ressource pour répondre à la demande écotopienne.

2.6 Nouveau modèle

Dans le modèle macro, les valeurs des conditions météorologiques sont lissées sur la totalité du territoire ; un centre solaire dans le nord est aussi performant qu'une centrale dans le sud. Si l'on prend en considération la disparité des ressources entre les régions, est-ce que la production énergétique est suffisante ?

- Mettre en place des profils régionaux.
- Chaque région sera représentée par un nombre d'infrastructures initiales.
- Des facteurs été/hiver.
- Des facteurs de pertes.
- Des facteurs météorologiques.

Fonctionnement : Lorsque le bloc énergie reçoit une demande, il lance des appels d'offre vers les régions.

3 Bloc Alimentation

3.1 Modélisation

Comme pour le modèle macroscopique, le bloc Agriculture est structuré autour d'un agent producteur et d'un agent consommateur. L'agent producteur peut à présent produire du poisson et ne suit plus un modèle de production à la demande. En parallèle, l'agent consommateur représente toujours la population française, mais ne régit donc plus la production et s'adapte à celle-ci.

3.1.1 Régime alimentaire / profils de consommation

Afin d'affiner notre modèle, nous avons adopté une première approche consistant à intégrer différents profils de consommation alimentaire à notre population simulée. Initialement, cette population suit un régime alimentaire reflétant la répartition actuelle en France, c'est à dire un régime en grande majorité carnivore [2]. Chaque mois, les individus ont une probabilité de modifier aléatoirement leur régime alimentaire. Néanmoins, le régime initial est considéré comme leur régime de prédilection, ce qui implique une tendance accrue à y revenir si l'opportunité se présente. Dans notre représentation, nous avons choisi de nous focaliser sur quatre régimes alimentaires principaux en France : omnivore, flexitarien, végétarien et pescetarien, tout en décidant de ne pas prendre en compte d'autres régimes spécifiques tels que sans gluten ou sans lactose, ce dernier n'ayant aucun intérêt étant donné l'absence de produits laitiers dans notre modèle.

3.1.2 Manque de nourriture et carences

Pour aborder la problématique de l'équilibre entre production et consommation alimentaires, nous avons cherché à comprendre les enjeux liés à la malnutrition. À cet effet, nous avons intégré des indices de malnutrition et modélisé les conséquences d'un déficit alimentaire, notamment les carences nutritionnelles. Les carences sont conceptualisées comme un facteur influençant l'augmentation du risque de mortalité d'un individu. Ce risque est fonction de la quantité de nourriture manquante et de l'âge de l'individu. Il s'accroît lorsqu'un individu ne peut pas accéder aux stocks alimentaires, mais diminue progressivement lorsqu'un individu parvient à accéder à la nourriture.

Par ailleurs, lorsqu'un individu ne peut pas obtenir certaines ressources alimentaires spécifiques, il existe une possibilité qu'il modifie son régime alimentaire pour compenser cette carence. Comme mentionné précédemment, la probabilité de retourner à son régime alimentaire initial augmente lorsque la disponibilité des ressources s'améliore. Cette dynamique cherche à refléter les comportements alimentaires réels face aux variations de l'accès à la nourriture.

3.1.3 Recyclage des déchets et composte

Concernant la gestion et le recyclage des déchets associés au secteur agricole, notre hypothèse de départ repose sur l'idée que chaque déchet produit résulte d'une forme de gaspillage. Nous avons modélisé le comportement de chaque individu en matière de gaspillage et de recyclage en fonction de plusieurs facteurs, notamment son niveau d'éducation, son régime alimentaire et sa tendance à sortir de chez lui. La quantité de ressources ainsi récupérée est ensuite réutilisée sous forme de compost pour stimuler et accroître la production agricole. Cette approche vise à intégrer un cycle vertueux de gestion des déchets dans le modèle, reflétant une stratégie de développement durable.

3.1.4 Production adaptative

Afin de pousser notre modèle plus loin, nous avons cherché à harmoniser la production et la consommation. Pour ce faire, nous avons modifié l'ordre d'exécution par rapport à notre modèle macroscopique précédent. Alors qu'auparavant les aliments étaient produits à la demande des consommateurs, désormais, la production précède la consommation. Le modèle suit un plan de production initial, et la quantité de ressources produites est ajoutée aux stocks existants. Les individus consomment ensuite ces ressources, jusqu'à épuisement ou non.

Le mois suivant, nous ajustons la production future en fonction de l'état des stocks, en prenant en compte non seulement la consommation mais aussi la dégradation naturelle des denrées, qui varie selon le type de ressource. Cette adaptation de la production vise à maintenir un équilibre réaliste, car nous limitons les variations drastiques de la production d'un mois à l'autre afin d'éviter des fluctuations trop irréalistes.

Un autre mécanisme d'adaptation que nous avons mis en place est la prévision du manque de ressources un an à l'avance. Nous estimons nos besoins en ressources en nous basant sur la moyenne de production de l'année précédente et calculons les besoins spécifiques, comme pour l'eau. Si nous anticipons une pénurie de ressources, nous passons en mode de "production réduite" (`low_production`). Dans ce mode, nous diminuons considérablement la production des aliments les plus exigeants en termes de ressources critiques et redistribuons les économies aux autres productions, tout en cherchant à maintenir des niveaux de stock adéquats.

3.1.5 Initialisation des données

Nous avons initialisé les données liées à la consommation et à la production agricole en France à l'aide de chiffres réels, dont toutes les sources sont en annexe.

Ressources nécessaire à la production (sources : [3]) :

Produit(1kg)	Conso eau (L)	Conso énergie (kWh)	Conso surface (m ²)	Qté travailleurs
viande	15415	8	27	0.1
légumes	322	0.3	1.34	0.1
fruits	962	0.3	0.658	0.1
céréales	1600	0.3	0.413	0.1
poisson	0	5.2	0	0.1
coton	5200	0.2	11	0.1

Additionnellement à cela nous avons fait les hypothèses que :

- Les animaux d'élevage sont nourris aux céréales, nous avons donc ajouté la ressource céréale (elle-même produite dans le bloc Agriculture) nécessaire à la production de viande. Nous avons initialisé cette valeur à 3 kg de céréales pour produire 1 kg de viande.
- Les poissons se nourrissent dans leur éco-système.

Émissions de CO₂ (sources : [4]) :

Produit(1kg)	Émissions de CO ₂ (gCO ₂ e)
viande	3191.7
légumes	260
fruits	1300
céréales	560
poisson	1300
coton	1650

Consommations individuelles mensuelles (en kg) (sources : [5]) :

Régime	Viande	Légumes	Fruits	Céréales	Poisson	Coton
omnivore	6.67	4.8	3.9	3.6	2.775	0.5
végétarien	0	7.2	4.8	4.5	0	0.5
flexitarien	2.67	4.8	0.920	2.920	0	0.5
pescetarien	0	4.8	0.920	2.920	3.92	0.5

Les consommations du régime omnivore sont basées sur des données réelles, en revanche les données des autres régimes sont assez approximées étant donné le peu d'informations que l'on a pu trouver sur internet. La quantité de coton consommée est aussi incertaine, cela dit son impact sur le bloc Agriculture est négligeable devant celui du bloc Urbanisme.

3.2 Interactions avec les blocs extérieurs

Nous avons ajouté un certain nombre d'interactions à celles qu'il y avait déjà dans le modèle macroscopique :

- Le bloc **Urbanisme** s'occupe dorénavant non seulement de faire des demandes de production de coton pour construire les bâtiments et les habitations, mais aussi de fournir des travailleurs au domaine agricole. Cela crée une nouvelle catégorie d'emploi qui a une incidence sur la production de nourriture. Le nombre d'agriculteurs nécessaire est une ressource impactant directement la production.
- On a ajouté une liaison avec le bloc **Transport**, car il nous semblait important que les transports deviennent des facteurs limitants à la production et à la consommation de nourriture. Étant donné que nos transports écotoyens font la distinction entre circuit long et circuit court (voir Section 4), on calcule la quantité de nourriture de chaque type (viande, légumes, fruits, céréales, poisson) et on estime la portion livrée en circuit court à 23% [1]. Le reste est livré en circuit long. On demande alors au bloc Transport s'il est possible de transporter cette quantité de nourriture, et si il n'y a pas assez de transports de marchandises en circuit court ni en circuit long, la quantité de nourriture ne pouvant pas être livrée est perdue.

3.3 Matrice EM

En raison de contraintes de temps, il n'a pas été possible de finaliser la matrice EM complète pour inclusion dans ce rapport.

3.4 Expérimentation - Analyse de données

Nos expériences sont menées sur une période de 50 ans, en prenant en compte les paramètres démographiques suivants :

- Nombre de mini-villes simulé (MV_S) : 1
- Nombre d'habitants par mini-ville simulé (MVH_S) : 200
- Population simulée (P_S) : 10000
- Facteur d'échelle pour le nombre de mini-villes (α) : 6725
- Facteur d'échelle pour le nombre d'habitants par mini-ville (β) : 50

La première expérience se concentre sur une situation de pénurie de ressources critiques et l'adaptation du modèle dans ce contexte spécifique. Nous nous plaçons donc dans un scénario où une mini-ville fait face à une carence en ressources essentielles pour l'alimentation de sa population. Nous examinerons tout d'abord les répercussions de cette pénurie sur les habitudes de consommation et les niveaux de production.

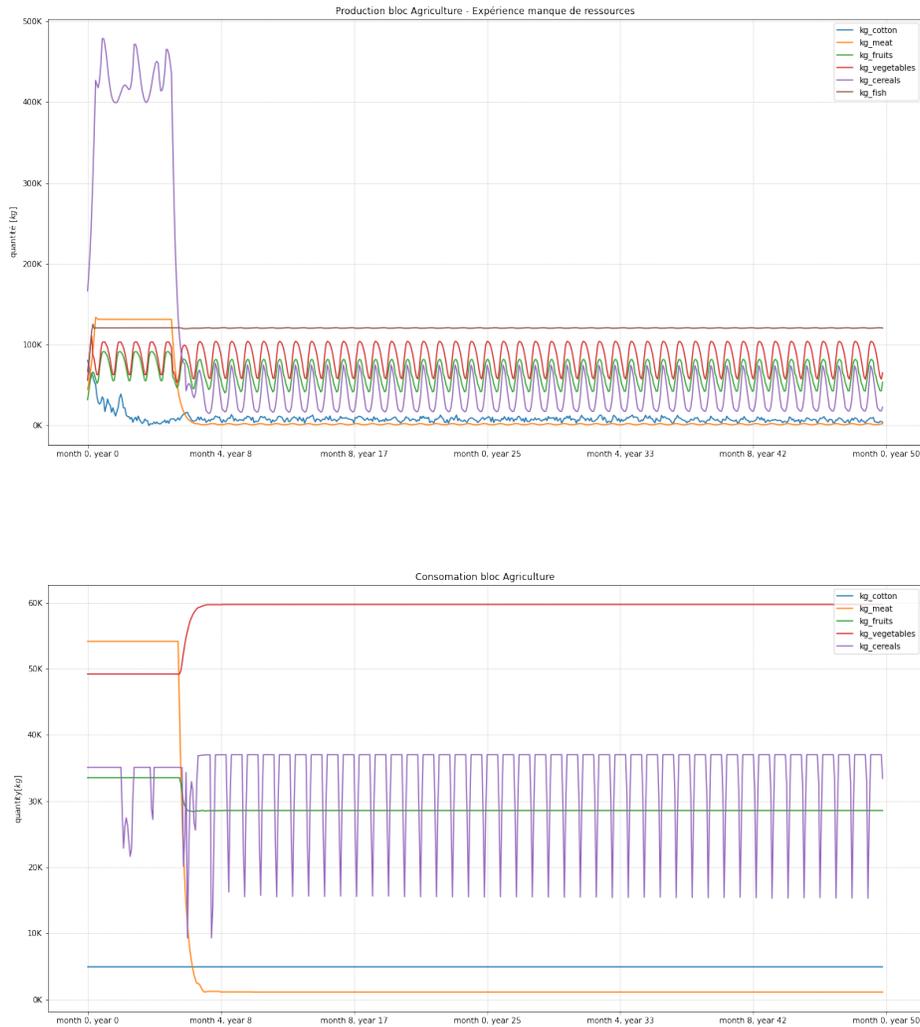


FIGURE 6 – Production et Consommation - Modèle manque de ressources

Nous observons que la production initiale est dominée par une quantité importante de céréales, principalement due à l’usage de ces céréales pour l’élevage et la production de viande. La crise des ressources est ici représentée par une pénurie significative d’eau. Le système anticipe alors ses besoins un an à l’avance et constate que l’eau deviendra une ressource critique. En conséquence, nous réduisons drastiquement la production de viande, ce qui a un impact direct sur la consommation de la population. Effectivement, nous notons une diminution de la consommation de viande tandis que celle des légumes augmente. Cette modification des habitudes alimentaires est également visible à travers l’évolution des régimes alimentaires au cours des 50 années d’expérimentation :

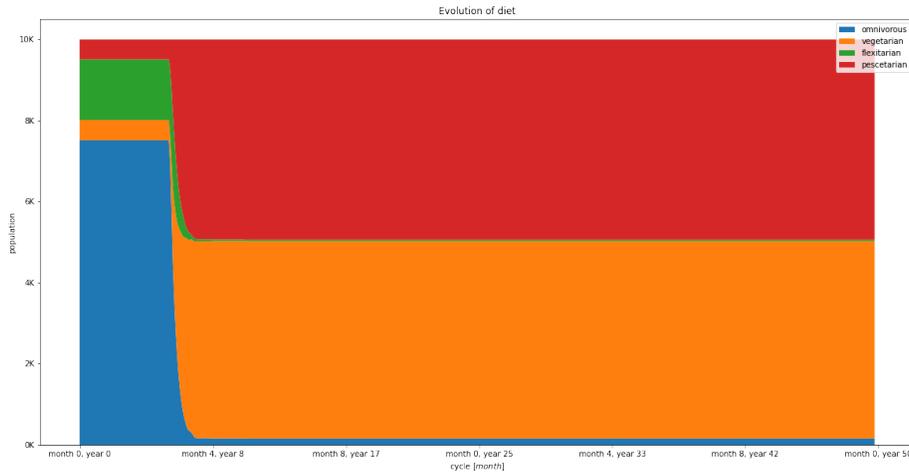


FIGURE 7 – Évolution des régime Alimentaire - Modèle manque de ressources

Face à la diminution de l’offre de viande, une large portion de la population tend à se tourner vers des régimes alimentaires où la viande est absente ou consommée en quantité réduite. Par conséquent, cette baisse de la consommation de viande entraîne une réduction de la consommation des ressources énergétiques et de l’empreinte carbone. Ce changement dans les habitudes alimentaires reflète une adaptation à la situation de pénurie, tout en ayant un impact positif sur la durabilité environnementale.

Il est clair que notre modèle démontre une capacité d’adaptation face à une situation de crise spécifique, telle que la pénurie d’une ressource. Cependant, sa capacité à gérer des crises multiples et simultanées reste limitée. En effet, dans le cas où plusieurs ressources viendraient à manquer en même temps (telles que la main-d’œuvre, l’eau et l’énergie, par exemple), le modèle pourrait se trouver dans l’incapacité de s’adapter à de multiples pénuries, menant potentiellement à une défaillance en chaîne de l’ensemble du système : une carence alimentaire pourrait entraîner une augmentation de la mortalité, ce qui réduirait la main-d’œuvre disponible, et ainsi de suite, créant un cercle vicieux difficile à briser.

4 Bloc Transport

4.1 Etat de la société dans la modélisation

4.1.1 Présentation générale

Le bloc transport gère le transport de passagers et de marchandises dans la France écotopienne. Il est responsable du transport industriel, de travailleurs et de loisir.

Dans ce bloc, les principaux enjeux sont :

- La consommation des ressources par les transports écotopiens, que ce soit en surface terrestre utilisée, en énergie consommée, en quantité de travailleurs requis, ou en CO² émis.
- La satisfaction de la demande de la population et des autres blocs en transports.
- Les enjeux de la transition du parc de véhicules français vers le modèle écotopien.

La simulation vise à commencer avec un parc de véhicules et une demande similaire au modèle français actuel, puis à tendre vers le modèle écotopien. Pour le modèle français actuel, nous nous reposons sur les chiffres présentés dans la bibliographie [6]. On part donc des chiffres actuels, et l'on essaie de remplacer les modèles de transports utilisés par des transports intégralement collectifs, dans véhicule individuel, et sans voiture thermique. La transition en découlant représente un des aspects principaux de notre simulation.

4.1.2 Choix de modélisation

Comme dans les autres blocs, on utilise un modèle se basant sur une constellation de 10 000 habitants, et l'on applique un facteur d'échelle pour arriver à une moyenne nationale.

Production de transports

Dans ce bloc, les productions sont représentées à travers *production_outputs_T*. On a fait le choix de ne pas représenter les trajets par kilomètre, mais plutôt de les approximer en classes de trajets : les trajets "longue distance" et "courte distance", et les trajets "passagers" et "marchandises". Cette modélisation a été choisie pour simplifier la représentation, et car on ne pourrait de toute façon pas utiliser de données géographiques précises (puisqu'on prend une seule constellation générique et qu'on lui applique un facteur d'échelle pour représenter la France).

Une unité produite par ce bloc correspond donc à un unique trajet, soit pour un passager, soit pour une tonne de marchandises, sur une courte ou sur une longue

distance.

Utilisation des ressources

Dans le bloc transport, pour produire des trajets, on utilise trois ressources.

Les *work_spot* représentent le nombre de travailleurs nécessaires pour faire fonctionner un véhicule. On prend en compte l'entretien long terme des véhicules, pas seulement le chauffeur. On ne prend pas en compte la construction. Ainsi, on a au moins un employé requis pour un trajet dans un véhicule collectif (le conducteur), mais possiblement plus.

Les *kWh_energy* représentent la quantité d'énergie nécessaire au voyage. Ici on prend seulement en compte les voyages, et pas la construction ni l'entretien des véhicules.

Les *m²_land* représentent la surface au sol utilisée par le réseau routier et ferroviaire. Cette variable fluctue beaucoup, puisque nous n'avons pas pris en compte le temps de construction et de destruction des rails et routes dans cette modélisation, pour des raisons de manque de temps, et car nous avons jugé que cela ne nous aurait pas apporté grand chose. La surface au sol est cependant très intéressante car elle nous informe sur les proportions d'utilisation de véhicules ferroviaires ou de véhicules routiers. De plus, elle reste intéressante si l'on atteint les limites éventuelles de l'utilisation du territoire disponible. Actuellement, l'espace au sol est proportionnel au nombre total de véhicules.

Emissions

Les seules émissions du bloc transports sont les émissions de CO₂ (ou *gCO₂e emissions*). Elles sont émises au moment de la production de trajets.

Parc de véhicules

On modélise un certain nombre d'éléments liés aux véhicules écotopien.

Tout d'abord, la variable *total_vehicles* représente le parc de véhicules complet. Il est initialement le même que le parc de véhicules français actuel, et évolue au cours de la simulation pour tendre vers celui du modèle écotopien. On applique évidemment un facteur d'échelle pour s'accorder à la taille de l'agglomération de 10 000 habitants.

La variable *degradation_factor* permet de gérer la disparition des véhicules trop vieux et hors d'état. À chaque tick, on supprime un pourcentage des véhicules de chaque catégorie correspondant au *degradation_factor* de la catégorie.

La variable *production_vehicles* indique quels types de trajets les véhicules sont capables de fournir. En effet, dans écotopia, des camions sont exclusivement utilisés pour le transport de marchandises sur de courtes distances. Des trains et des camions sont utilisés pour le transport de marchandises longues distances. Des trains et taxis sont utilisés pour le transport de passagers longues distances. Des vélos, minibus et taxis sont utilisés pour le transport de passagers courtes distances. Les

voitures personnelles permettent d'effectuer n'importe quel type de trajet.

La variable *missing_vehicles_previous_tick* indique quels véhicules l'on doit construire au tick suivant. S'il manque des véhicules d'un type pour atteindre les proportions idéales visées à un tick, on en construit d'avantage au tick suivant.

La variable *vehicles_built_per_tick* indique le nombre de véhicules que l'on est capable de construire à chaque tick. À chaque fois que l'on construit des véhicules d'un type, le nombre correspondant augmente, et à chaque fois que l'on en construit pas, il diminue. Cela permet de faire représenter l'expansion de l'industrie de construction de véhicules en fonction de la demande.

On a ensuite les variables statistiques par véhicule; *energy_consumption* qui représente l'énergie consommée par chaque véhicule sur un trajet court, *workers* représentant le nombre d'employés requis, *co2_emission* le CO² émis, et *transport_production* la quantité de trajets générés par l'utilisation d'un véhicule. En effet, même si un train consomme plus d'énergie qu'une voiture, il "génère" plus de places quand on l'utilise.

Objectif de véhicules écotopiens

Les variables associées aux proportions de véhicules représentent les proportions idéales visées par la population écotopienne. Il ne s'agit donc pas des proportions de véhicules que l'on possède au début de la simulation, mais des proportions qu'on cherche à atteindre en "fin" de simulation. À chaque tick, on essaie de satisfaire la demande en utilisant en priorité les véhicules selon ces proportions, et si ce n'est pas suffisant, on utilise les véhicules restants et l'on construit plus des véhicules des types manquants.

Ainsi, on peut simuler une transition tout en maintenant une satisfaction de la demande sur les premières années, où l'on doit construire assez de véhicules pour changer le mode d'utilisation des transports vers un système privilégiant les transports collectifs.

On considère que si les objectifs de véhicules peuvent être atteints en théorie, alors il le seront en pratique, et même si des véhicules supplémentaires, potentiellement plus pratiques sont disponibles (comme des voitures thermiques), il ne seront pas utilisés. On imagine que la société écotopienne est soit très sensibilisée aux enjeux environnementaux actuels, soit gérée par une dictature sans pitié interdisant l'utilisation de véhicules trop polluant sous aucun prétexte.

Aspect multi-agents

Dans notre modèle, la granularité des consommations de transports provient à la fois de l'utilisation qu'en font les autres blocs, et des décisions que prennent les agents individuels en fonction de leur état.

En effet, simuler une seule agglomération nous permet de simuler une population d'humains prenant des décisions différentes selon leur classe, âge, etc. Dans le bloc transport, cela se traduit par des tendances à voyager différemment selon l'activité

professionnelle. Un nourrisson n'a par exemple pas de voyages liés à son travail. De plus, les autres blocs (**Alimentation** et **Urbanisme**) font appel au bloc transport pour des déplacements dont ils ont besoin (voir les blocs respectifs).

4.1.3 Dépendance aux ressources des autres blocs

Le bloc transport est dépendant des blocs **Energie**, pour la consommation d'énergie (kWh_energy) et **Urbanisme** ($work_spots$), pour sa dépendance sur les travailleurs. On utilise également la ressource m^2_land du bloc **Territoire**. Pour les limitations de production en fonction des autres blocs, on utilise un critère de satisfaction (entre 0.0 et 1.0), qui est donné par $ressources\ demandées / ressources\ reçues$.

Si un ou plusieurs blocs ne fournissent pas assez de ressources, on prend la satisfaction minimale parmi les satisfactions des trois ressources, et l'on multiplie la production totale du bloc par cette satisfaction.

Les blocs **Alimentation** et **Urbanisme** sont dépendants du bloc **Transport**, respectivement pour transporter de la nourriture depuis les stocks vers les consommateurs, et pour amener des humains au travail.

Cependant, nous n'avons pas constaté de manque de ressources du côté des transports, dans un sens comme dans l'autre.

4.1.4 Rendu visuel du bloc transport

On affiche les résultats du bloc transports dans trois onglets différents, classés par thème.

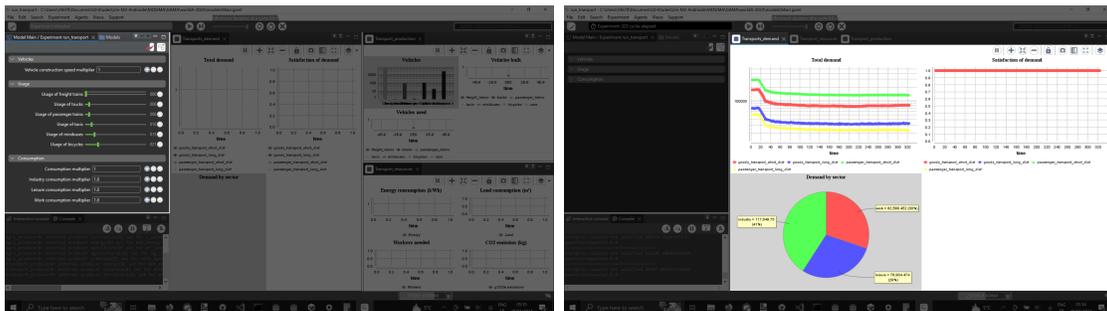


FIGURE 8 – Onglet paramètres [A] et Onglet demande [B]

Paramètres : Les paramètres du blocs transport permettent de faire varier ses paramètres initiaux ainsi que ses objectifs de convergence.

Avec `vehicle_construction_speed_multiplier`, on peut faire varier la vitesse de construction des véhicules.

Avec les paramètres de `Usage`, on peut définir quel est le régime de véhicules visé pour le modèle écotopien. Tant que ce régime de véhicules n'est pas atteint, on continue à produire les véhicules manquants. Enfin, avec les paramètres de `Consumption`, on peut faire varier les degrés de consommation de la population, que ce soit la consommation générale ou la consommation par secteur d'activité.

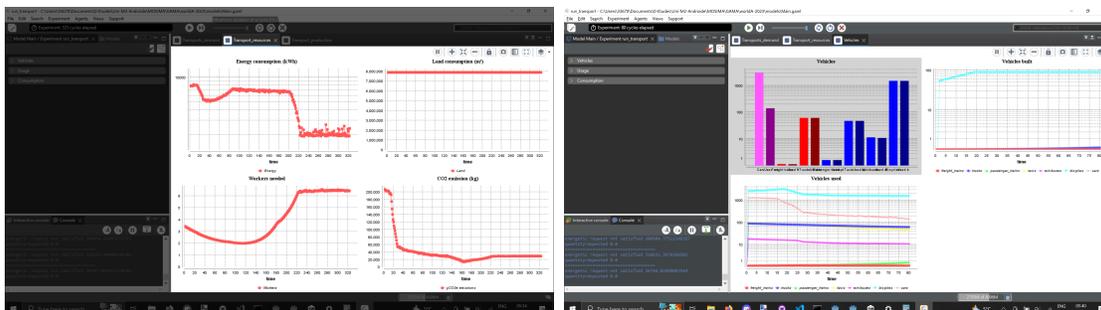


FIGURE 9 – Onglet ressources [C] et Onglet véhicules [D]

4.2 Production et consommation

On a essayé d'estimer la production actuelle française de nos différents véhicules : Pour calculer les trains et métros, nous avons notamment considéré que l'âge moyen du parc français a 30 ans, et que l'on reconstruit 1/30e du parc français tout les ans. Pour le nombre de voitures électriques, on décide arbitrairement de la fixer à 100 000 voitures. Le nombre actuel est bien plus faible, mais il augmente de manière très dynamique, et permet d'avoir une bonne estimation de la production française à court terme.

Trains	Métros	Camions	Taxi	vélos
25	3.1	4000	8000	71 000

Une fois cette production initiale établie, nous avons décidé d'implémenter un facteur représentant l'augmentation mensuelle de la production. Pour établir ce facteur, nous nous sommes inspiré des données historiques britanniques de la production d'avions durant la seconde guerre mondiale. La transition est une situation de crise qui impliquerait probablement une mobilisation industrielle similaire à une guerre, d'où l'utilisation de ces nombres. Le coefficient mensuel obtenu sur ces données est de une augmentation de 1.02 de la production mensuelle lorsque la production actuelle est insuffisante.

Les émissions de CO^2 sur la production des trains et métros ont été calculés en multipliant leur poids moyen par les émissions qu'un bloc d'aluminium de poids

similaire émettent. Une méthode similaire est utilisée pour calculer la consommation électrique nécessaire. Les données pour les voitures électriques, camions et vélos sont accessibles en ligne, ce qui nous donne le tableau suivant, valable pour la production de ces véhicules :

transports	émissions de CO ²	consommation énergie
trains	117 tonnes CO ²	5 460 000 kWh
métro	10 tonnes CO ²	392 000 kWh
camion	440 tonnes CO ²	306 000 kWh
taxi	12 tonnes CO ²	15 300 kWh
vélo	0.262 tonnes CO ²	2 300 kWh

4.3 Résultats du modèle

4.3.1 Analyse des résultats

Satisfaction de la demande

On observe qu'en partant du parc français actuel, la demande est toujours atteinte. Cela est dû en grande partie au fait que le parc de voitures personnelles reste actifs pendant presque 200 cycles de la simulation. Il permet donc de combler les manques d'un système de transports purement collectifs le temps que la société ait le temps de construire les véhicules nécessaires. Cependant, on a quelques approximations qui pourrait faire douter du fonctionnement d'une telle transition en pratique. On ne prend pas en compte les problèmes logistiques qu'entraîneraient un changement massif des transports en France, ni les questions personnelles d'utilisateurs qui préféreraient garder leurs voitures personnelles, ni les problèmes sociaux engendrés par les fermetures ou reconversions des industries de véhicules personnels, ni encore les complications à échelle humaine liées à un systèmes de véhicules entièrement collectifs (personnes en situation de handicap, congestion de réseau à petite échelle, inégalités d'accès au réseau, etc.).

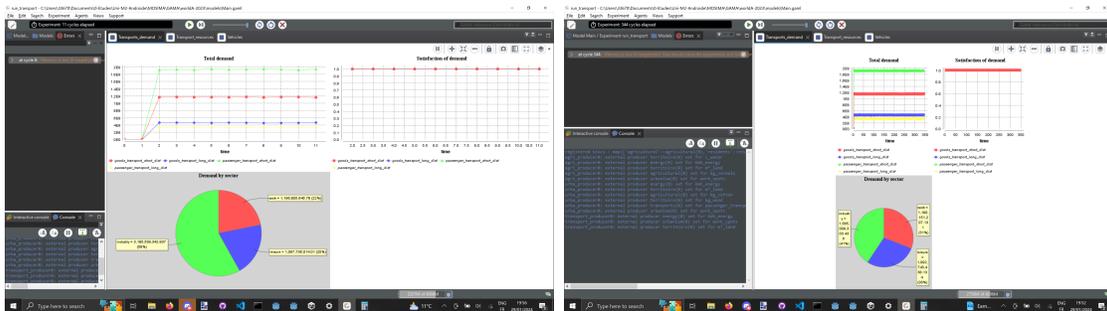


FIGURE 10 – Statistiques de demande avant [A] et après [B] convergence

On peut également noter qu’une transition en coupant les véhicules personnels du jour au lendemain serait bien plus compliquée, puisque la demande ne serait pas satisfaite pendant une longue période (montré sur la simulation suivante, où l’on a retiré les voitures).

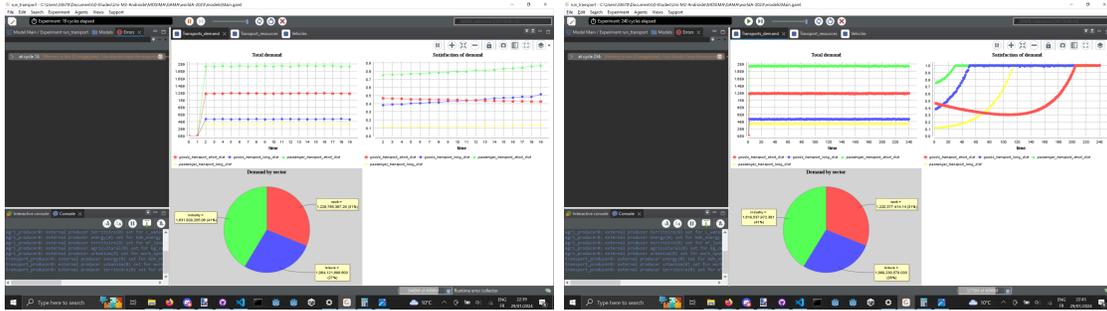


FIGURE 11 – Demande dans une simulation sans voitures avant [A] et après [B] convergence

4.3.2 Transition du modèle

On peut clairement observer une transition en plusieurs étapes à travers les simulations effectuées. Au début des simulation, on a bien un parc et une utilisation des transports correspondant au système français actuel. En fin de simulation, on a atteint le modèle idéal écotopien, où plus aucune voiture n’est en circulation (bien qu’il en reste encore un certain nombre en état de fonctionnement). Cependant, on peut remarquer plusieurs étapes à la transition du modèle actuel vers le modèle écotopien.

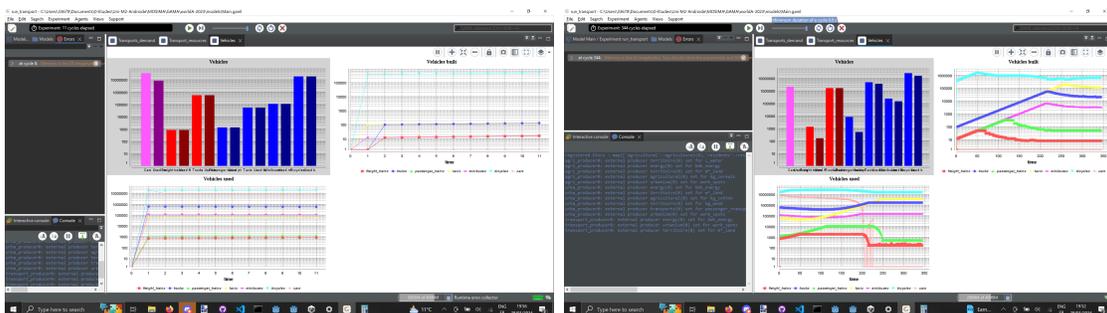


FIGURE 12 – Statistiques véhicules avant [A] et après [B] convergence

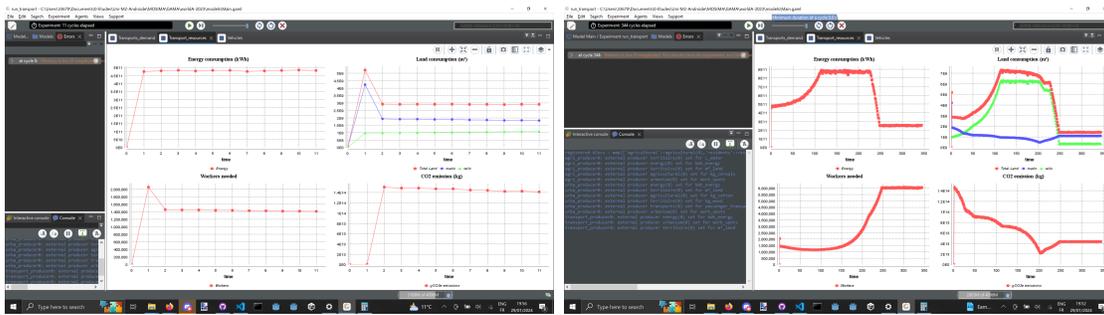


FIGURE 13 – Statistiques ressources avant [A] et après [B] convergence

On peut clairement distinguer plusieurs étapes à l'évolution des transports dans cette France écotopienne. On a déterminé que l'on pouvait observer quatre étapes différentes, visibles sur la figure ci-dessous.

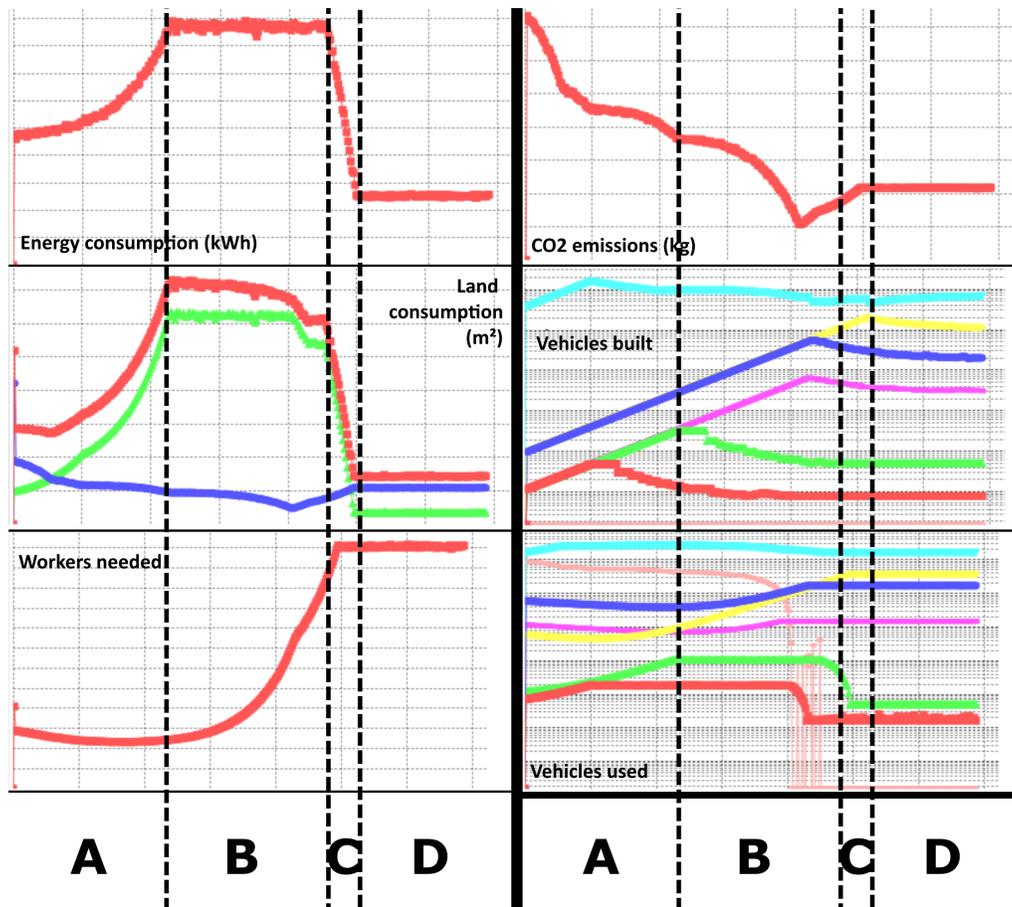


FIGURE 14 – Évolution des transports

Phases :

- A- Expansion 1/2 (0 à 120) : on part du modèle français actuel et l'on essaie de se tourner vers le modèle écotopien, qui utilise beaucoup plus de transports collectifs. On construit donc énormément de véhicules publics, sans toutefois beaucoup s'écarter du mode de consommation actuel.
- B- Expansion 2/2 (120 à 225) : on continue l'expansion, mais on a fini de produire des trains (transports de marchandises et de passagers longue distance). La production de véhicules et d'infrastructures ralentie donc. Cependant, on manque encore beaucoup de transports collectifs sur de courtes distances, dont la production commence à augmenter exponentiellement. On augmente donc énormément le nombre de travailleurs nécessaires au fonctionnement du bloc transport.
- C- Passage au collectif (225 à 250) : on arrive au point où les véhicules personnels deviennent de moins en moins nécessaires, et sont rapidement remplacés par des véhicules collectifs. L'utilisation de voitures thermiques personnelles diminue donc considérablement, comme la consommation énergétique et les émissions de CO².
- D- Convergence (à partir de 250) : on atteint les valeurs objectifs pour chacun des modes de transports, et la simulation semble atteindre un point de stabilité durable.

4.3.3 Conclusion

On voit donc que bien que la transition prenne du temps, elle finit par se faire, et ce sans que l'on échoue à pallier à la demande à un moment ou à un autre de la simulation. Les véhicules personnels jouent d'ailleurs un rôle crucial dans cette transition.

Cette transition se fait sans aucun moment où l'on échoue à pallier à la demande des utilisateurs. Cependant, en particulier au début de la transition, on dépasse largement la quantité d'énergie utilisée par le secteur des transports de la société française actuelle. Le système écotopien nécessite également de très nombreux travailleurs dans le secteur des transports, ce qui est cohérent puisqu'on quitte un système avec beaucoup de véhicules personnels, ne nécessitant pas de conducteurs à plein temps, vers un système ayant intégralement des transports collectifs.

Du côté des émissions de CO², le système écotopien paraît très positif, puisqu'il utilise majoritairement des véhicules électriques. Cependant, les ressources liées à la fabrication des batteries ne sont pas prises en compte, et pourraient poser un problème en situation réelle, en particulier si on relie ce point au fait que le système écotopien réalise très peu d'imports-exports.

5 Bloc Urbanisme

5.1 Modélisation et choix

Sur le modèle macro, nous avons évoqués l'idée de faire une transition des logements actuel vers les logements ecotopiens. Cette transition n'as pas été retenu pour le modèle micro car la complexité du problème était trop grande par rapport aux gains apportés à notre modèle. Cependant, nous avons garder une variable qui permet de commencer la simulation avec un nombre initial de logement qui ne correspondent pas a des logements ecotopiens.

Le ratio maison versus immeuble fait parti des paramètres que l'on fixe volontairement au lancement de la simulation, ce qui nous permet d'observer comment le modèle répond dynamiquement à ces changements systémiques. De manière à avoir une petite incitation à construire des maisons, on rajoute quelques places de loisir au sein de celles-ci, représentant la possibilité d'avoir des invités de temps en temps. A l'inverse, les immeubles proposent des place de travail pour représenter des commerces et petites industries placées au rez-de-chaussée. Cette différenciation permet également d'éviter que les maisons ne soient systématiquement ignorées lorsque la possibilité de créer un logement apparaît.

bâtiment	nombre d'habitants	nombre d'emplois	journée de loisir
immeuble	25	30	0
maison	15	0	5

Enfin, nous avons également implémenté 2 activités "professionnelles" : les usines, et les écoles. Les écoles sont des bâtiments permettant d'éduquer 1000 mineurs, couvrant tout le cursus de la maternelle au lycée. Elles emploient 150 adultes. Les usines quand à elles hébergent des entreprises et des lieux d'activité, et emploient 30 personnes.

Toute la charge du bloc urbanisme correspond donc à gérer la répartition de la construction et de l'espace pour une ville, et l'on met à l'échelle de la France par la suite les informations générées localement. La priorité va pour les logements dans un premier temps, puis aux lieux de travail, d'étude et enfin de loisir.

Le lieux de travail est nécessaire pour fournir des travailleurs aux autres blocs. C'est là que les travailleurs dans l'agriculture, l'énergie et le transports sont embauchés, par conséquent sans espaces de travaille construit, le bloc urbanisme ne peut offrir de travailleurs aux autres blocs.

5.1.1 Comment calcule-t-on le coût de nos bâtiments en bois ?

Nous nous intéressons tout d'abord au coût de construction d'un bâtiment. Nous sommes intéressés par la quantité de bois et de cotons nécessaire. Pour les bâtiments en bois (tout les bâtiments sauf les maisons individuelles), on calcule tout d'abord la surface construite, en s'inspirant de bâtiments existants, selon le tableau suivant :

bâtiment	surface	inspiration
immeuble	600m ²	triple-decker américain
usine	700m ²	bâtiment esus
bâtiment éducatif	10 000m ²	6.6 fois une école primaire
lieux de loisir	60m ²	parc avec un vestiaire ou petit bâtiment

Une fois ces valeurs fixées, nous pouvons calculer le volume de bois nécessaire pour construire ces bâtiments, via un tableau venant d'Arcabois. Avec ce volume, nous pouvons trouver la quantité de CO² émise pour produire le bâtiment.

L'estimation du coton est plus compliquée, car le coton est présent pour l'isolation et dépend de la surface totale extérieure du bâtiment. Cette surface a été calculée pour l'immeuble (la construction la mieux isolée) et on estime derrière la quantité de coton nécessaire pour isoler les autres bâtiments en partant de cette base. Ça n'est pas précis, et surestime au pire la quantité de coton nécessaire (on n'isole pas une usine comme un immeuble généralement).

La quantité d'énergie nécessaire pour la construction est elle basée sur la norme BBCA pour la construction de logements, visant à produire 600 kg/m² en CO₂ lors de la construction. Au final, on obtient donc les valeurs suivantes pour nos bâtiments :

bâtiment	surface au sol	bois	coton	CO ²	kWh
immeuble	600m ²	30 tonnes	2 tonnes	360 tonnes	5000
maison	600m ²	0	30 tonnes	180 tonnes	5000
usine	800m ²	35 tonnes	2 tonnes	420 tonnes	7000 kWh

5.1.2 Données de consommation énergétique

La consommation énergétique des constructions est déduite de leur surface, en partant du principe qu'elles obéissent à la norme RT 2012 relatif à la consommation énergétique des résidences, de 50 kWh/m²/ans, et on multiplie par 2 pour la consommation de l'usine. On obtient ainsi les valeurs suivantes de consommation énergétique :

bâtiment	surface	consommation mensuelle
immeuble	600m ²	2520 kWh
usine	700m ²	5000 kWh

5.2 Interactions

5.2.1 Bloc démographique

La production du bloc urbanisme n'est régie que par le bloc démographie. En effet, nous nous basons uniquement sur la demande des habitants ainsi que leurs caractéristique pour produire nos constructions. Cela implique que si un autre bloc a besoin de travailleurs on ne pourra pas les générer si, dans notre populations, nous n'avons pas des personnes éligible pour travailler.

Détails des caractéristique Attribut "study level" : va définir la quantité d'années passer par l'individu dans le système scolaire. attribut "leisure activity" : va définir la quantité de places de loisirs utilisé par l'individu par mois. Attribut "activity" : peut prendre 4 valeurs selon l'âge de la personne :

- None : si $age < 5$ ans.
- Student : si $5 \leq age \leq age + study\ level$ de la personne. la personne consomme une place d'étude.
- Canwork : si $18 + study\ level < age < 60$: la personne consomme une place de travail.
- Retired : si $60 < age$.

En plus de cela tout les individus consomme des places de loisirs selon leurs "leisure activity" et une place de logement.

5.2.2 Bloc Territoire, agriculture et énergie

Le bloc territoire régie la quantité de terrain consommé par l'activité humaine. - Contient les ressources de m² pour construire les trucs Les blocs territoire, agriculture et énergie vont générer les ressources nécessaire pour construire les différentes structure du bloc urbanisme. Le bloc énergie va fournir l'énergie nécessaire a la construction d'une nouvelle ressource ainsi que la consommation énergétique par tic une fois la construction achevé. Le bloc territoire va fournir le bois, et enfin le bloc agriculture va fournir le cotons.

5.2.3 Bloc Transport

Lorsque le bloc urbanisme produit une place de travail, cette dernière ne peut pas être consommer directement par les autres blocs. La populations va consommer cette dernière pour ensuite générer un travailleurs. Pour que le travailleurs soit utilisable par les autres blocs, se dernier doit consommer 30.5 trajets courte distance ce qui

correspond aux trajets pour aller au travail durant 1 mois sachant qu'il fait un aller retour au travail 5 fois par semaine.

5.2.4 Tous les blocs

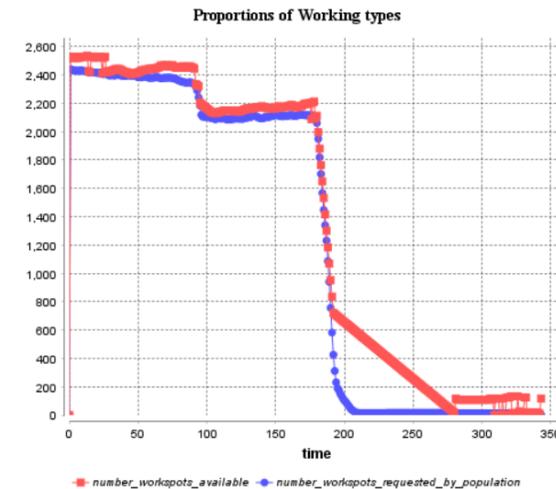
Les blocs peuvent ajouter la ressource travailleurs pour construire leurs ressources. ceci permet de rajouter de la collectivité entre les différents blocs.

5.3 Expérimentation

5.3.1 Évolution du travail selon le ratio maison/immeuble

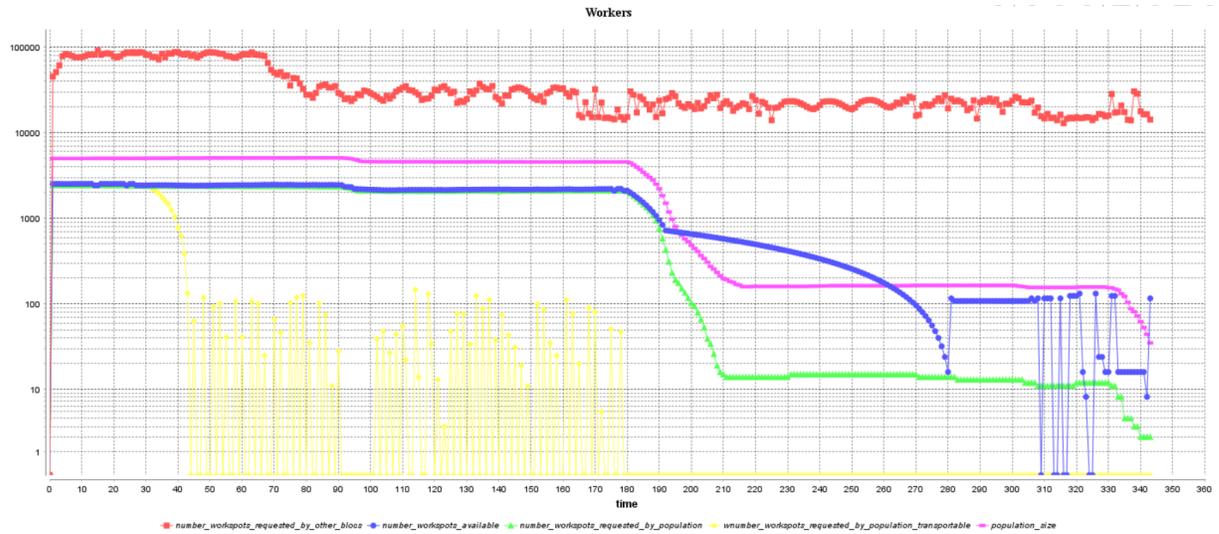
Nous allons essayer d'analyser l'impact du ratio maison/immeuble sur le travail dans une mini-ville de 5000 habitants.

La mini-ville contient 100 maisons et 170 immeubles, pour un total de 5050 logements (50% des logements proviennent de chaque type de logements). Le rez-de-chaussé d'un immeuble correspond à un lieu de travail pour 8 personnes. La mini-ville contient aussi 1 lieu de travail qui correspond a une usine, 2 espaces de loisirs, ainsi qu'un lieu d'étude qui peut accueillir 1000 élèves. Pour un ratio 50% d'immeuble et 50% de maisons nous affichons la distribution des lieux de travail entre les immeubles et les espaces de travaux.



Nous observons que les le bloc construit de plus d'espaces de travail/usines pour satisfaire la demande d'emploi car celle ci n'est pas totalement satisfaite par les logements. Nous pouvons observer aussi que le bloc ne construit pas de nouveau lieu de loisir car les maisons arrivent a atteindre. Au bout de 190 tics environs, nous remarquons un crash total du bloc urbanisme. L'affichage des différentes demandes

d'emploi es utile pour comprendre ce qui s'est passé.



On remarque qu'à ce moment, nous ne pouvons plus transporter les travailleurs, donc nous n'arrivons pas à construire de nouveau logement, ni à satisfaire la demande de transport ni à nourrir la population. De plus, on remarque que la demande des travailleurs réelle des blocs est toujours plus élevée que la quantité de travailleurs qui est réalisable par la populations.



Pour une configuration identique, mais exclusivement composée d'immeubles, la simulation demeure stable en raison de la réduction de la concurrence pour les res-

sources. En optant pour la construction d'immeubles, l'utilisation de coton diminue, cette ressource nécessitant une quantité significative d'eau, créant ainsi une moindre rivalité avec le secteur agricole qui sollicite également cette ressource.

6 Conclusion

Amplifier la granularité de notre modèle macroscopique nous a permis d’approfondir notre réflexion sur la possibilité d’appliquer le mode de vie d’Ecotopia à la France. Nous avons remarqué que pour certains blocs (Transport et Agriculture) le modèle se stabilisait sous certaines conditions, tandis que pour les autres on observe des demandes ou des consommations de ressources surprenantes. Nous n’avons pas eu le temps d’atteindre tous nos objectifs. Il y a plusieurs aspects qu’il serait intéressant de creuser :

6.1 Perspectives et Améliorations

6.1.1 Bloc Agriculture

- Concernant les interactions avec le bloc **Transport**, il pourrait être intéressant de faire en sorte que si il n’y a pas assez de transports en circuit court, mais assez en circuit long, on puisse livrer uniquement en circuit long - et inversement. Cela pourrait avoir une incidence sur la production de véhicules par le bloc Transport ainsi que sur les émissions de CO₂.
- Nous avons souhaité ajouter des **produits laitiers** dans les productions alimentaires étant donné l’importance de ces derniers dans les habitudes de consommation des français, mais faute de temps à accorder à la recherche de données, nous n’avons pu ajouter que le poisson. L’évolution de la consommation des produits laitiers pourrait aussi être intéressante à observer pour déterminer plus finement si les habitudes alimentaires françaises sont compatibles avec le modèle écotopien.

6.1.2 Bloc urbanisme

- Il pourrait être plus intéressant d’améliorer la prise de décision, par exemple en utilisant plutôt un arbre de décision.
- On pourrait ajouter de nouveaux lieux de travail, de loisirs et d’étude.
- Créer un agent par type de construction (i.e un agent qui gère la construction de logements, un agent qui gère les lieux de travail...) pourrait également améliorer la modélisation.

6.1.3 Bloc transport

Pour rendre cette simulation plus juste, on pourrait prendre en compte toutes ces ressources manquantes, comme les besoins en énergie et ressources dans la construction des véhicules, les ressources nécessaires à la construction des batteries, ou même les points de rechargement des véhicules électriques.

On pourrait également ajouter une notion de spatialisation, pour vérifier les problèmes de congestion à un niveau micro, et les questions de satisfaction de demande selon le lieu.

Nous pourrions également, avec plus de temps, ajouter des indices de satisfaction liés aux transports, par exemples liés à des grèves éventuelles, des retards des transports publics, ou même du temps passé dans les transports.

A Annexe

Références

[1] — AGRICULTURE —

Insee, "INSEE ANALYSES PAYS DE LA LOIRE", "En 2020, parmi les 5 250 exploitations agricoles ligériennes, 20% vendent en circuit court contre 23% en France métropolitaine."

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/7615923>

[2] Statista, Régimes alimentaires suivis par les Français en 2022

<https://fr.statista.com/previsions/1357004/regimes-alimentaires-suivis-par-les-francais>

[3] Consommation de ressources par la production Eau

<https://fr.statista.com/infographie/14996/combien-de-litres-eau-pour-produire-les-aliments/#:~:text=%C3%80%20l'inverse%2C%20les%20fruits,pour%20un%20kilo%20de%20tomates.>

<https://www.noovomoi.ca/style-et-maison/zero-dechet/article.empreinte-eau-aliments.1.7561033.html>

<https://globometer.com/eau-culture-coton.php>

Énergie

“Les consommations d’énergie dans les systèmes d’élevage bovin. Première contribution des Réseaux d’Elevage” T. Charroin, F. Galan, M. Capitain

<https://peche.ifremer.fr/en/Les-grands-defis/Les-pistes/Economie-d-energie>

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.034>

https://www.researchgate.net/publication/237695376_La_consommation_d%27energie_finale_de_diff%C3%A9rents_produits_alimentaires_Un_essai_de_comparaison

https://solagro.org/medias/publications/f47_3refplanete2010gc.pdf

Surface au sol

https://meurthe-et-moselle.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/036_Inst-Meurthe-et-Moselle/RUBR_Productions_agricoles/Productions_animales/Cas_types_bovins_viande/Cas_type_3.pdf

<https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2023/04/06-l-economie-bleue-en-france-2022-aquaculture.pdf>

<https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-fruits-et-legumes-une-production-arboricole-fruitiere->

[#:~:text=Surfaces%20cultiv%C3%A9es%20en%20France%20%3A&text=168%20400%20hectares%20de%20vergers,42%20000%20hectares%20de%201%C3%A9gumes](https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-fruits-et-legumes-une-production-arboricole-fruitiere-#:~:text=Surfaces%20cultiv%C3%A9es%20en%20France%20%3A&text=168%20400%20hectares%20de%20vergers,42%20000%20hectares%20de%201%C3%A9gumes)

<https://moselle.chambre-agriculture.fr/productions-agricoles/agriculture-biologique/production-laitiere-en-ab/>

Conso céréales

<https://www.ciwf.fr/actualites/2013/07/nourrir-9-milliards-habitants>
<https://excellentburger.com/index.php/impact-consommation/>

[4] Émissions de CO₂

<https://blog.lafourche.fr/empreinte-carbone-des-aliments>
<https://peche.ifremer.fr/en/Les-grands-defis/Les-pistes/Economie-d-energie>
<https://www.cousubio.com/blog/ecologie-textile/demarche-comptabilite-ges>

[5] Consommations individuelles en France

[https://agriculture.gouv.fr/telecharger/133709#:~:text=an%2Fhab%20en%202000%20%C3%A0,hab%20en%202020%20\(Agrete\).](https://agriculture.gouv.fr/telecharger/133709#:~:text=an%2Fhab%20en%202000%20%C3%A0,hab%20en%202020%20(Agrete).)
<https://fr.statista.com/themes/10239/le-marche-du-poisson-et-des-foies-de-mer-en-france/#:~:text=Les%20Fran%C3%A7ais%20sont%20le%20quatri%C3%A8me,fois%20par%20semaine%20en%202022.>
<https://fashionunited.fr/statistics/industrie-de-la-mode-habillement-statistiques-france>

[6] — TRANSPORT —

surface au sol utilisé par une ligne de train

https://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-igvpaca/docs/pdf/etudes/ins_lgvmed/ImpactsLGVMeddec2004.pdf

consommation totale en énergie des transports en france

[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transports-2023/19-consommation-denergie-des-transports-#:~:text=%C3%89volution%20de%20la%20consommation%20d,Champ%20%3A%20France%20m%C3%A9ropolitaine.&text=Avec%20470%2C1%20t%C3%A9rawatt-heure,%25%20par%20rapport%20%C3%A0%202019\).](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transports-2023/19-consommation-denergie-des-transports-#:~:text=%C3%89volution%20de%20la%20consommation%20d,Champ%20%3A%20France%20m%C3%A9ropolitaine.&text=Avec%20470%2C1%20t%C3%A9rawatt-heure,%25%20par%20rapport%20%C3%A0%202019).)

émission totale de co2 des transports en france

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transports-2022/19-emissions-de-gaz-a-effet#:~:text=Part%20des%20secteurs%20dans%20les%20%C3%A9missions%20de%20gaz%20%C3%A0%20effet%20de%20serre&text=En%202020%2C%20les%20transports%20sont,en%20repr%C3%A9sentation%2031%2C1%20%25.>

émission CO₂ pour la construction de : voiture électrique, métro, TGV, vélo, camion

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/de114.pdf> surface au sol du réseau ferroviaire français

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/ingenierie-des-transports-th14/infrastructure-ferroviaire-exploitation-et-securite-42576210/voie-ferree-trp3050/constitution-de-la-voie-ferree-trp3050niv10002.html>

combien on peut construire : trains, voitures, métros, vélos par mois

<https://www.cleanrider.com/actus/la-france-face-au-defi-de-la-production-locale-de-velos/>
Stats globales transports en france

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-transports-edition-2023>
gros tableau
http://www.lmm.jussieu.fr/~lagree/DIVERS/klasse_de_mer/a_inklure/tanguyTGV/tgv.html
<https://www.sncf-connect.com/aide/calcul-des-emissions-de-co2-sur-votre-trajet-en-train>
<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/regularite-quotidienne-lignes-sncf/>
<https://www.transilien.com/fr/page-corporate/transilien-presentation>
https://www.sncf.com/sites/default/files/press_release/Communiqu%C3%A9%2017%2010%202019%20-%2020%20ans%20SNCF%20Transilien.pdf
<https://www.renault.fr/faq-electrique/voitures-electriques-france.html>
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transport-2021/9-vehicules-de-transport-collectif-urbain>
<https://www.iledefrance-mobilites.fr/le-reseau/services-de-mobilite/bus>
<https://fr.statista.com/statistiques/688429/chiffre-affaires-principaux-fournisseurs-systemes-auto>
<https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/combien-de-velos-les-francais-possedent-ils-et-pour-quoi-faire>
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/le-parc-de-poids-lourds-est-en-legere-augmentation-au-1er-janvier-2022>
<https://fr.statista.com/statistiques/506558/longueur-trajet-moyen-reseau-autoroutier-france/>
<https://www.ecologie.gouv.fr/informations-cles-du-secteur-du-transport-marchandises-trm>
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277910?sommaire=4318291#titre-bloc-3>
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transports-2022/18-consommation-denergie-des-transports>
calculer la production de trains
<https://fr.statista.com/statistiques/473457/materiel-moteur-ferroviaire-france/>
metro lyon
<https://www.techno-science.net/definition/15648.html>
metro lille
https://fr.wikipedia.org/wiki/MÃ‰tro_de_Lille#MatÃ‰riel_roulant
metro toulouse
https://fr.wikipedia.org/wiki/MÃ‰tro_de_Toulouse#MatÃ‰riel_roulant
metro marseilles
https://fr.wikipedia.org/wiki/MÃ‰tro_de_Marseille#MatÃ‰riel_roulant
metro rennes
https://fr.wikipedia.org/wiki/MÃ‰tro_de_Rennes#MatÃ‰riel_roulant
renault trucks
https://fr.wikipedia.org/wiki/Renault_Trucks#Chiffres_de_vente
energy consumption
<https://www.acea.auto/figure/energy-consumption-during-car-production-in-eu/>
RER + transilien

