

PREDIT 4/ Groupe 06

Recherche : Enjeux spatiaux, économiques et politiques des scénarios de mobilité durable à l'horizon 2050

**Convention DRI N° 09 MT CV 19
Convention ADEME N°0966C0216**

Rapport de la tâche 2 : Spatialiser les environnements urbains et périurbains dans une logique « ville post carbone »

Décembre 2011

**B. Château
B. Bougnoux
A. Bouvard**

Enerdata

47, Avenue Alsace-Lorraine
38000 Grenoble
France

www.enerdata.net

s.a.s au capital de 100 000 euros
RCS Grenoble 381 703 859

TABLE DES MATIERES

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	2
2. BASES DE LA SPATIALISATION	2
2.1. Typologie de spatialisation.....	2
2.2. Quantification	5
3. SPATIALISATION DE VLEEM - TILT	6
3.1. Sous-modèle " Démographie ".....	7
3.2. Sous-modèle: "Information, capital humain et croissance économique"	14
3.3. Sous-modèle "Mobilité", lien avec "TILT"	18
4. RE-QUANTIFICATION DES SCENARIOS DE MOBILITE DURABLE	28
4.1. Quantification / re-quantification des hypothèses des scénarios de mobilité durable.....	28
4.2. Nouvelles projections.....	31

1. Contexte et objectifs

La précédente recherche sur la mobilité durable a bien souligné l'importance cruciale de la maîtrise de l'espace lorsque l'on cherche à réduire très fortement les émissions directes de GES des transports. Mais dans le même temps, la représentation spatiale dans la modélisation VLEEM-TILT restait pour le moins simpliste, pour ne pas dire caricaturale, tant au niveau des espaces urbains et périurbains, que pour les flux de transport interrégionaux et internationaux. Il est donc nécessaire de spatialiser les scénarios. Ces derniers doivent donner à penser. A quoi peut ressembler un usage de l'espace propice à la réduction des émissions de GES ?

Parallèlement, Enerdata a conduit le programme européen de recherche PACT (« Pathways for Carbon Transition »), financé par le 7ème PCRD (et co-financé par l'ADEME pour Enerdata), dont un des axes touche précisément à la dimension géographique adéquate (notamment en matière d'urbanisation) pour analyser les transitions post-carbone, et qui a fourni une base précieuse pour cette tâche 2.

Toujours sur la dimension géographique, le LET a développé avec l'aide du PREDIT un outil de simulation de l'accessibilité appelé MOSART (Modélisation et simulation de l'accessibilité aux réseaux et aux territoires). Plateforme numérique de simulation, MOSART vise, en matière d'accessibilité urbaine, à donner une priorité à l'espace sur les gains de temps. Moyennant quelques adaptations, cet outil peut aider à répondre à des interrogations sur la forme optimale de la ville « post-carbone ».

La tâche 2 consiste à mettre en œuvre les étapes suivantes :

- définir une typologie d'ensembles urbains et périurbains suffisamment homogènes au regard des variables caractéristiques évoquées plus haut ;
- quantifier, pour chaque ensemble homogène, les valeurs moyennes pertinentes de ces variables caractéristiques
- proposer une représentation spatiale quantifiée des flux de personnes et de marchandises pour une agglomération type de chaque ensemble, à partir d'un SIG. Le cas de l'agglomération lyonnaise servira ici de base de travail à l'aide de l'outil MOSART.
- simuler, à l'aide du SIG, les modifications de ces flux entraînées par les contraintes mises sur le système urbain dans les différents scénarios de mobilité durable
- introduire dans TILT une désagrégation de la population urbaine selon les ensembles urbains et périurbains homogènes
- recalculer les valeurs moyennes des variables caractéristiques sur la base de la distribution de la population selon les ensembles homogènes d'un côté, des simulations du SIG de l'autre.

2. Bases de la spatialisation

2.1. Typologie de spatialisation

Le choix de la typologie d'ensembles urbains et périurbains suffisamment homogènes a été mené de concert avec les analyses développées dans le cadre des programmes européens PACT et PASHMINA (PARadigm SHift Modelling and INovative Approaches), afin de garantir une cohérence d'ensemble de tous ces travaux, et de permettre l'extension future des scénarios de mobilité durable à l'ensemble de l'Union Européenne (tâche 8).

Cette typologie privilégie deux axes majeurs au regard des préoccupations de mobilité:

- un axe "valeur du temps - vitesse - opportunités"
- un axe "individualisme - densité"

Le facteur temps-vitesse fait une distinction entre « faire les choses rapidement » ou « lentement ».

«Faire les choses rapidement» exprime que l'on cherche à maximiser le nombre de produits fabriqués et les opportunités de consommation par unité de temps. La concentration de la production, de la distribution et des activités de service dans de grandes unités pour bénéficier d'économies d'échelle, et la liaison de ces unités avec les marchés locaux et mondiaux via des transports rapides en sont les vecteurs principaux.

C'est le paradigme de l'économie mondialisée moderne et des modes de vie qui vont avec, qui exige de grandes quantités d'énergie par habitant, une forte productivité du travail, une forte intensité capitaliste et des marchés mondiaux soutenus.

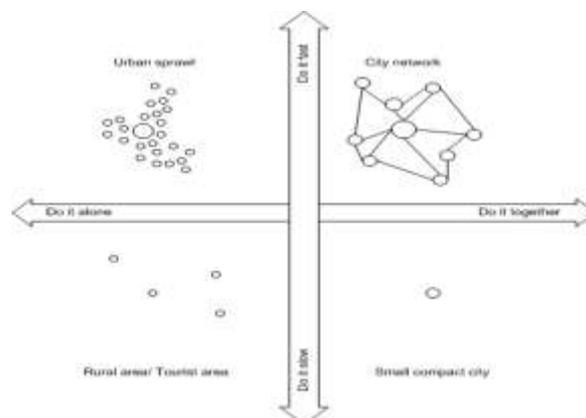
" Faire les choses lentement" suppose une moindre concentration dans la production, la distribution ou les services. Les unités organisationnelles sont plus petites, demandent moins d'énergie par habitant, une intensité du capital et une productivité du travail plus faibles et une plus grande dépendance aux marchés et ressources locaux. Avec en contre-partie une moindre diversité des opportunités de consommation par unité de temps.

Le facteur de densité fait la distinction entre « faire les choses seul » ou « ensemble ».

Nous faisons les choses « seul » lorsque nous roulons dans notre propre voiture, vivons dans une maison dans une zone périurbaine ou rurale. Nous faisons les choses "ensemble" lorsque nous vivons dans des immeubles au sein des villes, lorsque nous partageons les services de transport collectif.

La combinaison des deux facteurs ci-dessus débouche sur quatre formes urbaines typiques :

Figure 1: Formes urbaines typiques



Première forme : Grandes régions urbaines avec des banlieues concentriques de faible densité autour d'un noyau de ville mono-centrique. Forme typique de l'étalement, les lieux de travail et les opportunités de consommation y sont surtout concentrés dans le centre de la ville ou – c'est une tendance plus récente – dans des centres de production et de consommation en banlieue (p. ex. districts de bureau près des aéroports internationaux, de grands centres commerciaux en périphérie, etc.), tandis que les ménages tendent à habiter des maisons dans une périphérie de plus en plus éloignée, de densité décroissante. Cette forme urbaine génère des volumes élevés de trafic, très dépendants de voiture, les alternatives de transport étant difficiles à fournir dans des zones de faible densité. La concentration des lieux de travail et des opportunités de consommation dans le centre ville ou dans les centres de banlieues provoque des problèmes de congestion au quotidien ou hebdomadaires aux heures de pointe.

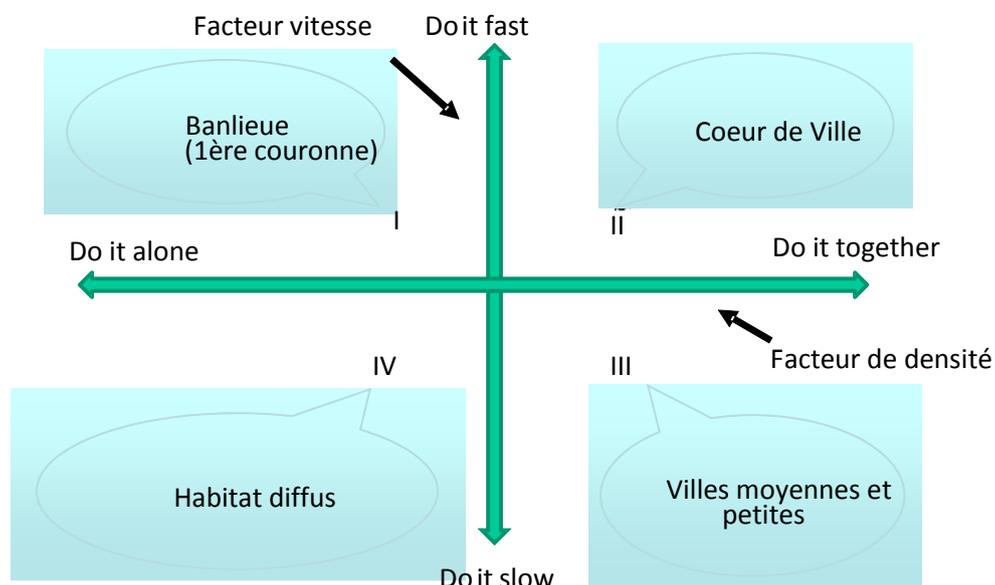
Seconde forme: Réseau de villes de compact/haute densité, connecté au moyen d'infrastructures de transport rapide (p. ex. TGV ou autoroutes), qui permettent de voyager confortablement dans la journée, entre les villes. Les lieux de travail, les opportunités de consommation et les quartiers résidentiels sont distribués dans les différents noyaux urbains. Des transports collectifs rapides et de haute qualité peuvent relier ces différents endroits grâce à la forte densité de demande de transport au sein des villes et entre elles. Cela aide à réduire les problèmes de congestion consubstantiels à l'étalement urbain, surtout si la voiture individuelle est restreinte dans les noyaux urbains. Une variante à l'échelle régionale est un réseau de villes satellites connectées à un grand noyau urbain au moyen de transports en commun rapides et fréquents (concept de Transit Oriented Development - TOD).

Troisième forme : Villes compactes moyenne et petites offrant un large éventail de production et d'opportunités de consommation pour une population vivant principalement à l'intérieur de la ville. Ces villes denses ne sont pas reliées à d'autres villes par des services de transport suffisamment rapides pour permettre l'aller- retour dans la journée, et doivent par conséquent attirer une variété d'activités économiques et sociales pour rendre la vie de la ville dynamique et autonome. Les lieux de travail et les opportunités de consommation sont situés à courte distance des logements, ce qui favorise la marche à pied et le vélo.

Quatrième forme : Ensembles de maisons individuelles éparses, dans les zones rurales ou périurbaines, typiques de la "ville diffuse". La production, les opportunités de consommation et les autres fonctions "urbaines" sont dispersées sur un vaste territoire sans un centre urbain dominant, généralement loin de l'habitat. La faible densité n'autorise pas le transport en commun rapide et fréquent, et l'incitation à développer un réseau routier rapide est également limitée.

Chacune de ces quatre formes d'urbanisation rassemble des populations qui vivent dans des conditions différentes (par exemple le centre ville versus les banlieues lointaines pour la première forme), et correspondent à des populations également de tailles très différentes. Or ces caractéristiques sont déterminantes au regard des volumes de mobilité et des densités de transport, eux-mêmes déterminants au regard des questions d'alternatives modales et de congestion des modes. Pour ces raisons, on a choisi de substituer à cette typologie initiale des formes urbaines, une autre typologie, axée sur les lieux de résidence, et articulée avec la première.

On segmente ainsi l'espace urbain et péri-urbain en quatre grandes zones qui communiquent entre elles, comme le montre le schéma ci-dessous. Un tel schéma peut de fait s'appliquer à la fois au niveau macro de VLEEM-TILT, et au niveau micro (bassin de vie) de MOSART.



2.2. Quantification

2.2.1. VLEEM/TILT

Au niveau macro, ces zones géographiques ont été documentées pour la France à partir d'une décomposition fine du territoire en communes. Les 36.000 communes ont été classées selon qu'elles appartiennent à l'une de ces 4 zones. La définition que nous avons retenue pour ces 4 zones est :

- Cœur de ville : villes centres des unités urbaines de plus de 80.000 habitants,
- Banlieues : autres communes appartenant à une unité urbaine de plus de 80.000 habitants,
- Petites villes : autres communes de plus de 3.000 habitants,
- Reste du territoire : autres communes de moins de 3.000 habitants.

Cette documentation fine a été réalisée pour les modules démographie et mobilité de VLEEM - TILT. Ce travail a notamment permis de mettre en relief des différences importantes de mobilité entre une personne habitant en centre-ville et une personne habitant en zone rurale.

La plupart des données statistiques directement disponibles ne permet pas de renseigner la démographie ou la mobilité selon ce découpage géographique, aussi a-t-il fallu travailler directement à partir de bases de données brutes et reconstituer/recalculer les données recherchées. Les principales bases de données françaises utilisées pour la recherche ont été :

Le recensement de la population : il a été largement exploité dans cette recherche. Chacune des 36.000 communes de France a été classée selon la forme urbaine à laquelle elle appartient. Pour chaque commune, une quarantaine d'indicateurs issus des recensements 1999 et 2007 ont été collectés. Ces indicateurs ont permis de décrire la population, les ménages, l'emploi, le lieu de travail et le lieu de résidence, les modes de transport utilisés pour aller au travail, le taux de motorisation des ménages, la nature de l'habitat (maison, appartement), la surface, l'ancienneté de l'habitat, les actifs et les chômeurs, les catégories socio professionnelles des actifs occupés, la population par tranche d'âge, la structure des ménages (1 personne, couple sans enfant, couple avec enfants...). On a ainsi pu mesurer de façon fiable un grand nombre d'indicateurs statistiques selon les 4 formes urbaines.

Enquête Nationale sur les transports et les déplacements (ENTD 2008) : l'objectif de cette enquête est la connaissance des déplacements des ménages et des moyens de transport tant collectifs qu'individuels. Elle décrit tous les déplacements, quels que soient le motif, la longueur, la durée, le mode de transport utilisé, la période de l'année ou le moment de la journée. Cette enquête permet d'avoir une vision globale et cohérente de tous les modes et situations de transport de personnes, d'observer les comportements des habitants de toutes les tailles d'agglomérations et d'estimer des indicateurs de mobilité tout au long de l'année. Par rapprochement avec les résultats des enquêtes précédentes, elle rend possible des comparaisons dans le temps.

MTUS - Multinational Time Use Study (Europe) : cette enquête a été développée au début des années 1980 par le Professeur Jonathan Gershuny, de l'Université de Bath. Cette enquête donne des informations intéressantes sur les budgets temps.

2.2.2. SIG MOSART

Le cas d'étude retenu à ce stade est celui du bassin de vie lyonnais.

MOSART a été ainsi structuré et documenté de façon à faire apparaître les flux de personnes circulant au sein des 4 zones et entre ces zones. L'accent a été mis principalement sur la notion

d'accessibilité. L'outil est d'ores et déjà disponible pour analyser en profondeur les conséquences des contraintes imposées à la mobilité dans les scénarios de mobilité durable.

Les premières simulations pour le bassin de vie lyonnais ont été réalisées avec MOSART. Elles visent à comprendre les impacts sur l'accessibilité des contraintes à la mobilité considérées dans les scénarios de mobilité durable (budget-temps, vitesse, distances, restriction de la voiture).

3. Spatialisation de VLEEM - TILT

La spatialisation de VLEEM - TILT a été menée conjointement pour la France et l'Europe (projets PACT et PASHMINA). Elle a été effectuée en trois temps.

Le premier temps a consisté à introduire les 4 zones ci-dessus dans le formalisme des modules démographiques de VLEEM-TILT. Ceci a conduit aux apports suivants:

- redéfinition de la notion d'espace rural en zone "habitat diffus" ;
- redéfinition de la notion d'espace "migrants suburbains" en lui retirant les migrations rural-urbain à l'intérieur du pays ;
- modification corrélative des mécanismes d'allocation des populations entre espaces "urbain", "rural" et "migrants-suburbains" ;
- reprise et approfondissement du formalisme de liaison entre structure de la population par âge et structure des ménages par catégories ;
- définition et formalisation du processus d'allocation dynamique des ménages par catégories selon les zones ;
- définition et formalisation du processus de calcul de la répartition des populations par classes d'âge selon les zones, à partir des ménages (cf ci-dessus).

Le second temps a consisté à lier les modules d'ensemble de la mobilité aux données constitutives des 4 zones:

- population par âge,
- ménages par catégories,
- taux d'équipement automobile par catégories de ménages,
- distances annuelles de parcours des automobiles,
- km/an/personne pour les déplacements courants urbains et régionaux (redéfinition également de ces concepts),
- part de la voiture dans les pkm urbains et régionaux.

L'idée dans ce second temps est de garder la cohérence d'ensemble existante de VLEEM-TILT sur les grands équilibres "vitesses modales - parts modales - BTT - distances" pour les déplacements urbains, régionaux et longue-distance, tout en prenant en compte les spécificités des 4 grandes zones de spatialisation.

Le troisième temps a consisté à développer des sous-modules d'équilibre "vitesses modales - parts modales - BTT - distances" pour les déplacements urbains et régionaux au sein de chaque zone, et d'assurer le lien et la cohérence entre ces sous-modules et les modules d'ensemble évoqués ci-dessus.

La version ainsi spatialisée de VLEEM-TILT a été ensuite documentée et calibrée avec les données recueillies précédemment.

Grâce à cette spatialisation, il est maintenant possible de tester des scénarios où la structure d'habitat se modifie au cours du temps, avec par exemple une redensification des espaces urbains (notamment à partir des banlieues), ou encore un développement des petites villes interagissant avec les plus grosses métropoles (modèle des villes en réseau).

3.1. Sous-modèle " Démographie "

3.1.1. Principes généraux

Le but du sous-modèle est de projeter la population et les ménages, par tranches de 25 ans, selon les catégories suivantes:

- population par âge : <25 ans; de 25 à 49; de 50 à 74; de 75 à 99; >99
- ménages par catégorie : ménages d'une seule personne, mono-parentaux avec un enfant, autres ménages de deux personnes, ménages avec plus de deux personnes
- ménages par classe d'âge du chef du ménage : <25 ans; 25-49; 50-74; 75-99; >99
- population et ménages par zone socio-géographique principale: urbains, ruraux, migrants.

Pour les zones urbaines et rurales, les déterminants de la population sont la fertilité naturelle et la mortalité, plus les migrations d'une région à l'autre. Dans le cas des pays ou régions à un stade précoce du processus d'urbanisation, les personnes migrant des régions rurales traditionnelles vers les villes sont assimilées aux migrants, ce qui n'est pas le cas pour les personnes se déplaçant des villes à la campagne dans les pays avancés. Les migrants, qui incluent les personnes provenant de l'extérieur du pays ou de la région, constituent une catégorie temporaire : après 25 ans, ils sont assimilés à des citoyens.

Selon leur âge et les tendances sociales, les individus sont affectés aux catégories de ménages de la façon suivante:

- < 25 ans : ce sont principalement des enfants qui appartiennent aux deux catégories de ménages avec enfants (très peu d'entre eux constituent un ménage par eux-mêmes) ;
- 25-49 : ils se trouvent dans les 4 catégories ;
- 50-74 : en grande partie ils vivent seul ou en couple, accessoirement avec des enfants ou des parents
- > 74 : vivent majoritairement seul ou en couple, certains d'entre eux avec leurs enfants ou en communauté.

Les principales tendances sociales considérées concernent:

- la proportion de personnes 25-75 vivant seules,
- la part de personnes 25-49 vivant en couple sans enfant,
- la part des ménages mono-parentaux dans les 25-49,
- la part des personnes au-dessus de 74 ans vivant avec leurs enfants ou en communauté.

3.1.2. Evolutions naturelles de la population

Les évolutions naturelles sont simulées de la même façon pour les zones « urbain », « rural » et « migrants ».

Les naissances (ajouts à la population au cours de la période) sont le produit d'un taux moyen de fécondité (un nombre moyen d'enfants par femme au cours de sa vie) par le nombre de femmes en âge de procréer au cours de la période (femmes ayant entre 15 et 49 ans durant la période, séparées en deux catégories d'âge : moins de 25 ans et de 25 à 50 ans à la fin de la période).

Les décès (retraits de la population au cours de la période) sont le produit, par groupes d'âge, de la population au début de la période par la variation du taux de survie entre le début et la fin de la période.

Les entrées sont, pour chaque zone socio-géographique :

- le taux de mortalité infantile,
- les taux de fécondité par groupe d'âge, avec et sans mariage,
- et les probabilités de survie selon l'âge.

Les sorties sont les populations par groupes d'âge et de la zone socio-géographique avant la migration.

3.1.3. Migrations et évolution de la population

3.1.3.1. Migrations internes

Le premier type de migrations internes se trouve entre zones rurales et urbaines. Il diffère selon l'avancement du processus d'urbanisation. Dans le cas d'un stade précoce du processus d'urbanisation, les migrations vont de la zone "rural" à la zone " migrants"; elles sont calculées en fonction du solde de l'évolution naturelle de la population rurale et un d'un maximum considéré pour la population rurale (liée notamment à la capacité de l'agriculture d'auto-subsistance à nourrir la population rurale). Les personnes au-dessus de 74 ans ne sont pas censées migrer ; pour les autres personnes, la structure par âge de la population de migration est considérée comme identique à la structure par âge de la population rurale de moins de 75 ans.

Dans ce cas, **l'entrée** est la population rurale maximale pour chaque année cible.

Dans le cas d'urbanisation mature, les migrations peuvent aller dans les deux sens entre zones urbaines et rurales. En particulier, le phénomène de "rurbanisation" (personnes vivant dans des villages ou de l'habitat dispersé proches de villes principales), fortement corrélé à l'étalement urbain, résultat de flux de population depuis les zones urbaine vers les zones rurales. Le déterminant de ces flux est exprimé par la part de la population vivant dans l'habitat dispersé. La structure par âge de la population migrante est considérée comme identique à la structure par âge des populations urbaines ou rurales selon la direction de la migration.

Dans ce cas, **l'entrée** est la part de la population totale vivant en habitat dispersé pour chaque année de la cible.

Le second type de migrations internes est entre les zones socio-géographiques « migrants» et « urbain ». L'hypothèse principale sous-jacente est qu'il faut environ 25 ans aux migrants pour adopter pleinement les mêmes comportements, modes de vie et habitudes de consommation que les citoyens. Ceci s'applique tant aux migrants venant de l'extérieur du pays ou de la région, qu'aux personnes se déplaçant des zones rurales traditionnelles vers les villes dans les premiers stades de l'urbanisation. La structure par âge des migrants dépend de la structure par âge des ménages migrants de la période précédente et des mouvements de population naturelle au cours de la période.

3.1.3.2. Migrations externes

Les migrations externes sont exogènes et résultent d'hypothèses. Elles peuvent être positives (entrées) ou négatives(sorties). Si elles sont positives, les personnes qui migrent de l'extérieur dans le pays ou la région durant une période sont localisées dans la zone socio-géographique « migrants » au cours de cette période, et rejoignent la catégorie « urbain » à la période suivante. Les migrations externes sont censées être limitées aux personnes entre 25 et 49 ans.

L'entrée est la population qui migre de/vers l'extérieur de chaque année.

Les évolutions qui en résultent pour la population sont les suivantes

"Urbain"

L'évolution de la population dans la zone "urbain", par classe d'âge, est la somme de trois termes :

- l'évolution naturelle de la population dans la zone « urbain »,
- les migrations internes entre « urbain » et " rural" (positives ou négatives),
- la migration interne de la zone «migrants» à la zone « urbain ».

"Rural"

L'évolution de la population dans la zone « rural » par classe d'âge, est la somme de deux termes :

- l'évolution naturelle de la population dans la zone « rural »,
- les migrations internes entre zones « urbain » et « rural » (positives ou négatives) ou la migration interne de « rural » vers la zone « migrants » (premiers stades de l'urbanisation).

" Migrants"

L'évolution de la population dans la zone « migrants » par classe d'âge, est la somme de trois ou quatre termes:

- l'évolution naturelle de la population dans la zone « migrants »,
- les migrations externes de l'extérieur,
- les migrations internes de « rural » zone « migrants » (seulement les premiers stades de l'urbanisation),
- les migrations internes de la zone « migrants » vers la zone « urbain ».

Population totale

La population totale par classe d'âge est la somme des populations par classe d'âge des trois zones après migration.

3.1.4. Allocation de la population aux catégories de ménages (par zone socio-géographique et globalement)**3.1.4.1. Personnes <25 ans**

M1: Ménages d'une personne (célibataires)

Une partie des personnes de moins de 25 ans constitue des ménages par eux-mêmes. Cette partie est supposée constante au fil du temps.

Parmi la population entre 25 et 74, ainsi que les moins de 25 ans qui constituent des ménages par eux-mêmes, une partie d'entre eux vit seule. La variation de cette partie dans le temps est l'une des principales tendances sociales considérées dans VLEEM et saisie par une hypothèse ad-hoc. Elle s'applique de la même manière à toutes les catégories d'âge, et donc par conséquent aux à ceux de moins de 25ans constituant un ménage par eux-mêmes

Pour résumer : la part des personnes < 25 vivant en M1 = part des personnes < 25 constituant des ménages x part des célibataires dans les personnes 25-74.

M2: Couple sans enfant

Une partie des moins de 25 ans constitue des ménages par eux-mêmes. Cette partie est supposée constante au fil du temps.

Parmi la population entre 25 et 49, ainsi que les moins de 25 ans qui constituent des ménages par eux-mêmes, une partie d'entre eux vivent en couple sans enfants. La variation de cette partie dans le temps est aussi une des principales tendances sociales considérées dans VLEEM et saisie par une hypothèse ad-hoc. Cette hypothèse s'applique de la même façon aux deux catégories d'âge.

Pour résumer : la part des gens < 25 vivant en M2 = part de gens < 25 constituant des ménages x part des personnes 25-49 vivant en couples sans enfants.

M3: mono-parental avec un enfant

Ceux de moins de 25 ans qui ne constituent pas des ménages par eux-mêmes sont des enfants. Par définition, il n'y a qu'un seul enfant par ménage M3: ainsi, le nombre d'enfants appartenant à M3 est

identique au nombre de ménages M3. Le nombre de chefs de ménage M3 qui a moins de 25 ans est calculé à partir de la part des personnes < 25 constituant un ménage M3. Cette part est supposée constante au fil du temps.

Pour résumer : personnes < 25 vivant en M3 = personnes de moins de 25 ans x part des personnes < 25 constituant un ménage M3 + nombre total de ménages M3.

M4: ménages de plus de deux personnes

Les enfants qui n'appartiennent pas aux ménages M3 (voir ci-dessus) sont dans les ménages M4. Une partie des moins de 25 ans sont des adultes de ménages M4. Cette partie est supposée constante au fil du temps.

Pour résumer : personnes < 25 vivant en M4 = personnes < 25 x part des personnes < 25 constituant un ménage M4 + personnes < 25 X (1 - part des < 25 constituant des ménages)-ménages M3.

3.1.4.2. Personnes 25-49 ans

M1: Ménages d'une personne (célibataires)

Parmi les personnes entre 25 et 74, ainsi que les moins de 25 ans qui constituent des ménages par eux-mêmes, une partie d'entre eux vit seule. La variation de cette partie dans le temps est, on l'a dit, l'une des principales tendances sociales considérées dans VLEEM et saisie par une hypothèse ad-hoc. Cette hypothèse s'applique de la même manière à toutes les catégories d'âge, en particulier la catégorie 25-49.

M2: Couple sans enfant

Parmi les personnes entre 25 et 49, ainsi que les moins de 25 ans qui constituent des ménages par eux-mêmes, une partie d'entre eux vit en couple sans enfant. La variation de cette partie dans le temps est aussi, on l'a vu, une des principales tendances sociales considérées dans VLEEM et saisie par une hypothèse ad-hoc, laquelle s'applique de la même manière aux deux catégories d'âge, en particulier la catégorie 25-49.

M3: mono-parental avec un enfant

Parmi les gens de 25 à 74, une partie d'entre eux est chef de famille monoparentale. La variation de cette partie dans le temps est également une des tendances sociales considérées spécifiquement dans VLEEM et saisie par une hypothèse ad-hoc. Cette hypothèse s'applique de la même manière à toutes les catégories d'âge, donc aux 25-49 ans. Une partie de ces familles monoparentales n'ont qu'un seul enfant et constituent des ménages M3 : cette partie est censée rester constante.

Pour résumer : personnes 25-49 vivant en M3 = personnes 25-49 x part des personnes 25-74 qui constituent des chefs de familles monoparentales x part des familles monoparentales avec un seul enfant.

M4: ménages de plus de deux personnes

Le reste de la population entre 25 et 49 ans vit dans des ménages M4. Mais certains d'entre eux vivent encore avec leurs parents et ne constituent pas des ménages M4 par eux-mêmes. Leur part dans l'ensemble de la population 25-49 est supposée demeurer constante au fil du temps.

3.1.4.3. Personnes 50-74 ans

M1: Ménages d'une personne (célibataires)

Parmi les personnes entre 25 et 74, ainsi que les moins de 25 ans qui constituent des ménages par eux-mêmes, une partie d'entre eux vit seule. La variation de cette partie dans le temps est, on l'a dit, l'une des principales tendances sociales considérées dans VLEEM et saisie par une hypothèse ad-hoc. Celle-ci s'applique de la même manière à toutes les catégories d'âge, en particulier la catégorie 50-74.

M2: Couple sans enfant

Une partie des 50-74 vit toujours avec des enfants à la maison et constitue des ménages M3 ou M4. Toutes les autres personnes 50-74, sans enfant, et qui ne sont pas célibataires, constituent des ménages M2.

M3: mono-parental avec un enfant

Parmi les personnes de 25 à 74, une partie d'entre eux sont chefs de famille monoparentale. Comme on l'a vu, cette partie fait l'objet d'une hypothèse qui tente de saisir une des principales tendances sociales considéré comme dans VLEEM. Elle s'applique de la même manière à toutes les catégories d'âge, donc aux 50-74 ans. Une partie de ces familles monoparentales ont qu'un seul enfant et constituent des ménages M3 : cette partie est censée rester constante.

Pour résumer : personnes 50-74 vivant en M3 = personnes 50-74 x part des personnes 25-74 qui constituent des chefs de familles monoparentales x part des familles monoparentales avec un seul enfant.

M4: ménages de plus de deux personnes

Une partie de la population entre 50 et 74 constitue des ménages M4. Cette partie est censée demeurer constante au fil du temps.

3.1.4.4. Personnes >75 ans

M1: Ménages d'une personne (célibataires)

Parmi ceux de plus de 75 ans qui ne vivent pas avec leurs enfants ou en communauté, une partie d'entre eux vit seule. Cette partie est censée demeurer constante au fil du temps.

M2: Couple sans enfant

Le reste de la population ≥ 75 qui ne vit pas avec les enfants ou en communauté constitue des ménages M2.

M3: mono-parental avec un enfant

On fait l'hypothèse qu'il n'y a personne de plus de 74 ans dans les ménages M3.

M4: ménages de plus de deux personnes

Une partie de la population au-dessus de 74 ans vit avec les enfants ou en communauté, c'est-à-dire dans des ménages M4. La variation de cette partie dans le temps est l'une des tendances sociales considérées spécifiquement dans VLEEM et saisie par une hypothèse ad-hoc..

3.1.4.5. Entrées et sorties

Les **entrées** principales de cette allocation qui reflètent les tendances sociales sont les suivants:

- part de la population 25-74, ainsi que les moins de 25 ans constituant des ménages par eux-mêmes, vivant seuls
- part de la population entre 25 et 49, ainsi les moins de 25 ans constituant des ménages par eux-mêmes, vivant en couple sans enfants
- part des 25 - 74 ans qui sont chefs de famille monoparentale
- part de la population au-dessus de 74 ans qui vit avec les enfants ou en communauté

Les autres **intrants** de cette allocation reflétant la structure sociale sont les suivantes:

- part des moins de 25ans constituant des ménages par eux-mêmes : général, M3, M4
- part des 25-49 ans vivant avec leurs parents
- part des familles monoparentales n'ayant qu'un seul enfant
- part des personnes > = 75 qui ne vivent pas avec leurs enfants ou en communauté, qui vivent seules

La **sortie** est la matrice d'allocation des personnes par tranche d'âge et catégories de ménages.

3.1.5. Ménages par catégories

3.1.5.1. M1: :Ménages d'une personne (célibataires)

Le nombre de ménages M1 est égal à la somme des personnes des cinq classes d'âge appartenant à des ménages M1, puisque le nombre moyen de personnes par foyer M1 est 1 par définition. La structure des ménages M1 par âge du chef de ménage est la même que la structure de la population par classe d'âge appartenant à M1.

3.1.5.2. M2: Couples sans enfant

Le nombre de ménages M2 est égal à la somme des personnes des cinq classes d'âge appartenant à des ménages M2 divisées par deux, étant donné que le nombre moyen de personnes par foyer M2 est 2 par définition. La structure des ménages M2 par âge du chef de ménage est la même que la structure de la population par classe d'âge appartenant à M2.

3.1.5.3. M3: familles monoparentales avec un enfant

Le nombre de ménages M3 est égal à la somme des personnes de 25 à 74 appartenant à des ménages M3, ainsi que celles au-dessous de 25 constituant un ménage M3 par eux-mêmes, le nombre moyen d'adulte par M3 ménage étant 1 par définition. La structure des ménages M3 par âge du chef de ménage est la même que la structure de la population par classe d'âge appartenant à M3.

3.1.5.4. M4: ménages de plus de deux personnes

Les ménages M4 comprennent les familles avec deux parents et un enfant ou plus et/ou un ou plusieurs grand parents, et les familles monoparentales avec plus d'un enfant. Le nombre de ménages M4 est égal à la somme de deux termes:

- le nombre de personnes de moins de 74 ans constituant un ménage, ni célibataires, ni en couple sans enfants, ni famille monoparentale, divisé par 2
- les familles monoparentales avec plus d'un enfant.

La taille moyenne des ménages M4 est le rapport entre la population appartenant à ces ménages M4 et le nombre de ménages M4. Le nombre moyen d'enfants dans les ménages de M4 est le rapport entre la population de M4 moins les adultes (parents et grand parents) et le nombre de ménages M4. La structure des ménages M4 par âge du chef de ménage est la même que la structure par classe d'âge de la population < 74 constituant les parents des ménages M4.

3.1.5.5. Ensemble des ménages

Le nombre total de ménages est la somme du nombre de ménages de chaque catégorie.

La taille moyenne d'un ménage (nombre de personnes par ménage) est le ratio de la population totale sur le nombre total de ménages.

Le nombre de ménages en fonction de la classe d'âge du chef de ménage est calculé comme la somme du nombre de ménages par classe d'âge du chef de ménage de chaque catégorie de ménages.

Le nombre de personnes par classe d'âge du chef du ménage est calculé comme la somme du nombre de ménages par classe d'âge du chef du ménage de chaque catégorie de ménages, multipliée par la taille moyenne du ménage de chaque catégorie.

La taille moyenne des ménages par classe d'âge des chefs de ménages est le rapport de la population et du nombre de ménages, pour chaque classe d'âge des chefs de ménages.

3.1.6. Urbanisation et spatialisation

Quatre zones géographiques sont identifiées pour saisir l'urbanisation et la spatialisation des logements, selon la densité et la taille des implantations:

- **cœur de ville**: zone « intra-muros » des villes de plus de 80 000 hab intra-muros
- **1ère couronne**: zone couverte par les municipalités de banlieue situées dans le voisinage immédiat du cœur de ville
- **villes petites et moyennes**: villes entre 3000 et 80 000 habitants « intra-muros », qui ne sont pas dans le voisinage immédiat du cœur de ville
- **habitat diffus**: toutes les autres zones de résidence.

Pour des raisons pratiques, l'habitat diffus est assimilé à la zone socio-géographique « rural » de VLEEM, bien qu'il puisse arriver que des villages (moins de 3 000 personnes) soient situés dans la 1ère couronne des cœurs de ville. Ainsi, le nombre et la structure des ménages vivant en habitat diffus sont identiques à ceux appartenant à la zone socio-géographique « rural ». Il en est de même pour la population. En d'autres termes, l'ampleur de l'étalement urbain est piloté par le pourcentage de personnes vivant dans la zone "rural"; les déterminants de la structure de la population (selon l'âge) et des ménages (par catégorie et par âge du chef de famille) qui participent à l'étalement urbain sont ceux considérés plus haut pour la zone "rural" (taux de fécondité et de mortalité, tendances sociales,...).

Les ménages des zones « urbain » et « migrants » sont ensuite affectés aux cœurs de villes, 1ère couronne et villes petites et moyennes, selon les catégories de ménages, afin de refléter l'évolution de l'urbanisation considérée dans les scénarios (hypothèses exogènes). Les **intrants** de cette allocation sont, pour chacune des catégories de ménages, et pour les zones « urbain » et « migrants » séparément, le pourcentage de ménages vivant dans chacune des trois zones urbaines. Ces pourcentages sont exogènes et sont utilisés comme variables de scénario pour caractériser le processus d'urbanisation au sein de chaque scénario.

Enfin, une fois les ménages par catégorie (et donc par taille) spatialisés, la répartition de la population entre cœurs de villes, 1ère couronne et villes petites et moyennes, peut être calculée à partir du nombre moyen de personnes par ménage selon la catégorie de ménage et la zone sociogéographique.

Les **résultats** de cette procédure d'allocation sont, pour chaque zone urbaine:

- nombre et structure (par catégorie) des ménages
- nombre et la structure (selon l'âge) de la population
- taille moyenne des ménages (= nombre de personnes par logement)
- nombre et la taille moyenne des ménages selon l'âge du chef de ménage

3.2. Sous-modèle: "Information, capital humain et croissance économique"

3.2.1. Principes généraux

Ce sous-modèle vise à projeter le capital humain, ses déterminants et la croissance économique qui en résulte par pas de 25 ans.

Le capital humain est défini comme un volume potentiel d'heures de travail par an, avec une productivité moyenne du travail. Les heures de travail sont déterminées par le niveau d'activité de la population au-dessous de l'âge de la retraite (module d'activité) et par le temps consacré au travail rémunéré par les personnes actives (module usage du temps). La productivité du travail est fonction du niveau d'information de la société, lui-même déterminé par le niveau moyen d'éducation de la population active (module d'information).

La production économique nationale est définie comme égale à un pourcentage du capital humain, ce pourcentage reflétant le niveau d'emploi de la population active et l'adéquation de la population employée au capital physique.

La production économique nationale se transforme en richesse globale et en aisance individuelle en tenant compte du pouvoir d'achat de la production nationale sur les marchés internationaux.

3.2.2. Module activité

Le module d'activité fait une distinction entre six classes de personnes actives : les chefs de ménage au-dessous de l'âge de la retraite, leurs conjoints et les enfants, selon qu'ils vivent dans ou en dehors de la zone « rural ».

Tout chef de ménage ayant, à la fin d'une période, un âge égal ou inférieur à l'âge moyen de la retraite est par définition déclaré « actif ».

Les conjoints des chefs des ménages (pour les ménages avec deux adultes au moins) ayant, à la fin d'une période un âge égal ou inférieur à l'âge de la retraite, sont également déclarés « actifs », mais pour une part seulement. Cette part reste inférieure à une limite globale faisant l'objet d'une hypothèse destinée à saisir les tendances socioculturelles concernant l'émancipation des femmes.

Les enfants de moins de 25 ans à la fin de la période, qui ne vont plus à l'école et qui sont autorisés à travailler selon le droit au travail, sont considérées comme « actifs ». L'enseignement secondaire est censé se terminer à 18 ans et l'enseignement supérieur à 24 : par conséquent, seuls les enfants ayant quitté l'école en ayant atteint l'âge légal du travail ou à la fin du secondaire peuvent être considérés comme « actifs ».

Pour chaque catégorie de personnes actives et chaque classe d'âge (0-24, 25-49, 50-74), le modèle calcule le taux maximum d'activité par personne, en prenant en compte l'âge de la retraite, la limite du taux d'activité pour les conjoints et le niveau d'éducation pour les enfants.

Il calcule ensuite le taux d'activité maximum par personne selon la catégorie de ménage (M1 à M4) - et pour tous les ménages- et chaque classe d'âge du chef de ménage, prenant en compte les trois classes de personnes actives au sein de chaque catégorie de ménages, à l'intérieur et en dehors de la zone "rural".

Enfin, le modèle calcule la population active maximale selon les classes d'âge de la population et les classes d'âge des chefs de ménages.

Les deux **intrants** spécifiques de ce module sont:

- l'âge moyen de la retraite, qui est une hypothèse exogène utilisée pour caractériser la politique socio-économique dans les scénarios
- le taux maximum d'activité des conjoints des chefs de ménages, qui est une hypothèse exogène pour saisir les tendances socioculturelles concernant l'émancipation des femmes.

Ses **résultats** sont le taux d'activité maximum par personne et la population active maximale, par classes d'âge, catégories de ménages, classes d'âge des chefs de ménages, à l'intérieur et en dehors de la zone "rural".

3.2.3. Module "usage du temps"

Le module "usage du temps" vise à simuler les changements dans la structure du budget- temps de la population du fait de l'évolution démographique, des changements socio-culturels et du développement socio-économique.

Dans VLEEM, le budget-temps est découpé selon cinq principales fonctions socioculturelles:

- abri et hébergement (tanière),
- nourriture et alimentation,
- travail rémunéré,
- accomplissement de soi,
- mobilité.

Pour chaque classe de ménages selon l'âge du chef de ménage, et à l'intérieur et en dehors de la zone "rural", l'évolution de la structure du budget-temps de l'individu (24 heures par jour) est régie par les règles suivantes.

La part du budget-temps consacrée à la fonction « tanière » est censée demeurer constante pour chaque classe d'âge de chef de ménage;

La part du budget-temps consacrée à la fonction « nourriture et alimentation » est supposée constante tout au long de la vie d'un chef de ménage.

Mais pour les ménages dont le chef a moins de 50 ans à la fin de la période, la part du budget-temps affectée à cette fonction baisse par rapport à ceux dont le chef avait moins de 50 ans au début de la période, conséquence du développement socio-économique¹. Cette baisse fait l'objet d'une hypothèse prenant en compte les deux influences majeures:

- la part du budget-temps alloué à cette fonction pour les ménages dont le chef avait moins de 50 ans au début de la période (transmission culturelle),
- la variation du niveau d'information du système socio-économique entre le début et la fin de la période (développement).

La part maximale du budget-temps allouée à la fonction « travail rémunéré » est calculée en divisant le budget-temps annuel consacré à cette fonction par une personne moyenne, par le budget-temps annuel total d'une personne moyenne (8760h/an). Le budget-temps annuel consacré à cette fonction par une personne moyenne est calculé en multipliant le taux d'activité moyen par personne, par la durée hebdomadaire moyenne de travail rémunéré (hypothèse) et par le nombre de semaines travaillées par an (hypothèse).

¹ cf www.VLEEM.org, final report VLEEM1, annex 1

La part du budget-temps consacrée à la mobilité (quotidienne et occasionnelle) est généralement considérée comme constante au fil du temps (conjecture de Zahavi). Mais on a montré qu'en cas de restrictions sur la vitesse non compensées par un raccourcissement des distances, il peut y avoir augmentation du budget-temps quotidien consacré à la mobilité (déjà observée dans certains pays comme la Suisse)². Dans certains cas, cette augmentation peut être en partie compensée par une réduction du budget-temps de transport pour des déplacements occasionnels (vacances, week-end... l' « effet barbecue »). Mais dans d'autres cas, elle peut être amplifiée par un budget-temps transport supplémentaire dans les déplacements occasionnels si le budget-temps de loisir extérieur au domicile s'accroît.

La part minimale du temps-budget allouée à la fonction « accomplissement de soi » est calculée comme un solde (sur 24 heures par jour).

Les **intrants** spécifiques de ce module sont:

- la part du budget-temps du ménage consacré à fonction « nourriture et alimentation » et à la mobilité
- rythmes de travail rémunéré légaux/observés

Ses **résultats** sont le nombre moyen d'heures quotidiennes consacrées aux 5 fonctions socioculturelles.

3.2.4. Module " information / éducation "

Le but du module « information / éducation » est de simuler l'évolution de l'indice du niveau d'information du pays/régions, sur la base de la scolarisation des enfants dans l'enseignement primaire et secondaire et du taux de participation des jeunes à l'enseignement supérieur : Université, écoles d'ingénieur, instituts techniques, etc....

Cet indice du niveau d'information joue trois rôles principaux dans le modèle:

- il détermine la productivité du travail (production par heure de travail rémunéré) à travers une élasticité qui est supposée constante au sein de chaque période de temps (mais qui peut être différente d'une période à l'autre) ;
- Il détermine le lien entre la production économique et la richesse, à travers une élasticité constante (qui à son tour détermine l'évolution de la parité de pouvoir d'achat) ;
- il détermine le rythme du progrès technique et de l'efficacité énergétique pour les divers services énergétiques attachés aux fonctions socioculturelles (alimentation et nourriture, tanière,...).

Chaque niveau de scolarité est associé à un contenu spécifique d'information relative. Par définition, le contenu d'information relative de l'enseignement primaire est associé à l'indice 1. Les contenus d'information des deux autres niveaux d'éducation et les indices associés sont ensuite étalonnés par régression entre les séries chronologiques sur la productivité du travail et sur la fréquentation scolaire.³

Le module « Information-éducation » calcule ensuite l'indice moyen du niveau d'information de chaque classe d'âge de la population comme suit:

² cf Enerdata, LET: " comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières". Rapport final au PREDIT, Avril 2008

³ Pour plus de détail sur cette calibration, voir www.VLEEM.org VLEEM1, Final report, annex 1, modelling the dynamics of the needs of energy services in VLEEM

- pour les personnes ayant moins de 25 ans à la fin de la période, l'indice moyen est calculé comme le produit des taux de scolarisation dans les 3 niveaux d'éducation (hypothèse), par l'indice d'information relative de chaque niveau;
- pour les personnes ayant plus de 25 ans et moins de 50 ans à la fin de la période, l'indice moyen est calculé sur la base de leur taux de scolarisation dans les 2 premiers niveaux d'éducation lorsqu'ils avaient moins de 25 ans (période précédente), et leur participation globale à l'enseignement supérieur au cours des deux périodes ;
- pour les personnes ayant plus de 50 ans à la fin de la période, le niveau d'information est supposé être le même que celui de la classe 25-50 ans à la période précédente⁴.

Trois ensembles d'indices de niveau d'information sont d'abord calculés, pour chaque zone socio-géographique: rural, urbain et migrants. Cet indice moyen de niveau d'information est calculé, pour chaque zone, à partir des populations et des indices de niveau d'information de chaque classe d'âge. Ensuite, l'indice global du niveau d'information est calculé comme une somme des indices par zone pondérés par les populations des zones.

Les **intrants** spécifiques de ce module sont :

- taux de scolarisation effective par niveau de scolarité, par zone socio-géographique, par classe d'âge
- contenus relatifs en information des 3 niveaux de scolarité (indices relatifs des deuxième et troisième cycles)

Le seul **résultat** est l'indice du niveau global d'information du système socio-économique.

3.2.5. Module " production de richesse "

Le module « production de richesse » vise à simuler l'évolution de la production économique, de la richesse et de l'aisance individuelle d'un pays ou une région, sur la base du capital humain et du niveau d'information.

Le module calcule d'abord un indice de productivité du travail (1 = année de base) sur la base de la croissance de l'indice du niveau d'information et une élasticité de la productivité du travail à cet indice. Cette élasticité reflète l'adéquation du contenu de l'éducation à la production économique et la vitesse d'adaptation de la main d'œuvre aux changements du capital physique. La calibration de l'indice du niveau d'information a donné la valeur historique de cette élasticité. Mais, selon les scénarios et les changements possibles dans le système éducatif et l'adaptation des compétences professionnelles, la valeur de cette élasticité peut changer au fil du temps.

Le module calcule ensuite un indice de production économique potentielle (1 = année de base) sur la base de la croissance du capital humain, c'est-à-dire le volume d'heures de travail rémunéré multiplié par l'indice de la productivité. Puis il calcule un indice de production réelle (1 = année de base), prenant en compte le pourcentage du capital humain réellement utilisé. À l'année de base, ce pourcentage est calculé comme le ratio de la production effectivement enregistrée dans les statistiques (PIB) sur la production théorique qui aurait résulté des heures du travail effectivement enregistrées multipliées par la productivité théorique du travail résultant de l'indice réel du niveau d'information. Pour les périodes futures, ce pourcentage reflète les changements attendus dans le taux de chômage et dans l'adéquation du capital physique au capital humain (viscosités dans le financement des investissements par exemple).

⁴ L'hypothèse fondamentale est que le niveau d'information d'une personne durant sa vie est déterminée par le plus haut niveau d'éducation initiale atteint par cette personne.

Le calcul suivant est celui des indices de la richesse globale et de l'aisance individuelle (1 = année de base). On suppose que plus le niveau d'information d'une société est élevé, plus forte est la valeur de sa devise sur le marché mondial, plus important le pouvoir d'achat d'une unité de production sur le marché mondial, plus riche le pays. L'indice de richesse globale est donc calculé sur la base de la variation de l'indice de la production économique réelle, avec une élasticité constante à l'indice du niveau d'information. L'indice d'aisance individuelle est calculé sur la base de l'indice de richesse, modulo les changements dans la population.

Tous ces calculs sont d'abord faits séparément sur les deux zones socio-géographiques "rural" et "urbain-migrants", et ensuite agrégés pour le pays tout entier à partir des valeurs absolues relatives à l'année de base.

Les **intrants** spécifiques de ce module sont:

- les élasticités de la productivité à l'indice du niveau d'information par période,
- l'élasticité constante de parité de pouvoir d'achat à l'indice du niveau d'information (régression sur les séries historiques),
- le taux d'utilisation réelle du capital humain.

Ses **résultats** sont:

- la production économique potentielle et réelle, en indices,
- la parité de pouvoir d'achat sur le marché international, en indice,
- l'indice de richesse globale,
- l'index d'aisance individuelle.

3.3. Sous-modèle "Mobilité", lien avec "TILT"

3.3.1. Principes généraux

Le sous-modèle "mobilité" simule l'équilibre dynamique entre le temps passé dans les transports, la vitesse moyenne de déplacement et la distance parcourue.

Pour les personnes, le temps passé dans les transports résulte d'un compromis dans les budgets-temps, d'abord dans la vie quotidienne, ensuite au sein de la fonction "accomplissement de soi" (loisirs en dehors du domicile). Pour le fret, le temps passé par les marchandises dans les transports résulte d'une d'optimisation tenant compte de la valeur de la marchandise (frais d'immobilisation dans le transport) et des frais de transport.

La vitesse moyenne de déplacement des personnes et des marchandises est le produit complexe des vitesses spécifiques des modes concurrents sur les différents types de trajets (déplacements urbains selon les zones urbaines, déplacements régionaux selon l'origine et la destination, déplacements de longue distance), et des parts modales sur ces différents types de trajet. Globalement, l'analyse statistique révèle de très fortes corrélations historiques entre la vitesse moyenne de mouvement et le PIB, tant pour les passagers que pour le fret.

Les distances parcourues sont les produits des temps passés dans le transport par les vitesses. Mais les distances parcourues dépendent également de deux autres facteurs principaux :

- géographique : l'aménagement de l'espace, où se trouvent les villes et comment elles s'étendent, où sont situées les unités de production, etc....
- socio-économique : où les gens vivent et où ils travaillent, leur équipement en modes de transport individuels (voitures, motos,...), leur comportement, leurs préférences, leur style de vie; l'organisation de la production.

Pour les passagers, le volume de la mobilité (passagers-km) est calculé comme la multiplication de la population par les distances parcourues chaque année par personne. Il est donc directement lié au sous-modèle "démographie" et aux résultats de l'équilibre temps-vitesse-distance. Pour le fret, le volume de la mobilité (tonne-km) est directement lié à l'indice de la production économique; seule sa répartition modale résulte de l'équilibre temps-vitesse-distance.

3.3.2. Motorisation et trafic automobile

L'équipement automobile des ménages est le premier déterminant de la circulation automobile, et il joue un rôle clé pour deux composantes au moins de l'équilibre temps-vitesse-distance pour les passagers : la vitesse et la distance. C'est aussi un intrant clé du sous-modèle TILT qui calcule les consommations d'énergie et les émissions du transport.

L'objectif de ce module est d'abord de simuler l'évolution du stock de voitures, par zone de résidence et globalement, puis le trafic automobile global, en véhicules-kilomètres et passagers-km.

Le taux d'équipement en voiture du ménage est calculé par une fonction logistique simplifiée, prenant en compte des niveaux de saturation spécifiques à chaque type de ménage et chaque espace de vie, et une élasticité constante unique liant l'écart du taux d'équipement au niveau de saturation à l'indice d'aisance individuelle (l'écart au niveau de saturation baisse de $1/\text{élasticité}$ lorsque l'aisance individuelle augmente de 1 %). Ce calcul est effectué pour chaque zone de résidence (villes-cœur, 1ère couronne, villes petites et moyennes, habitat diffus) et par type de ménages (une seule personne, deux personnes sans enfant, deux personnes dont un enfant, autres). Le stock de voitures est alors calculé en multipliant les taux d'équipement par le nombre de ménages pour chaque zone de résidence et chaque catégorie de ménages, puis en agrégeant sur les catégories de ménages et zones de résidence.

La circulation automobile est d'abord calculée en véhicules-kilomètres pour chaque zone de résidence, comme le produit du stock de voitures et d'une distance annuelle de parcours par an et par voiture. Cette distance est une hypothèse exogène qui tend à capter le mode d'utilisation des voitures dans les différentes zones de résidence, pour les divers scénarios. Elle est ensuite agrégée sur les zones.

Dans une deuxième étape, pour chaque zone, le modèle calcule le trafic passagers des voitures (en passagers-km), en prenant en compte le facteur de charge moyen des voitures (passagers-km / véhicule-km) dans chaque zone. Les facteurs de charge sont spécifiques à chaque catégorie de ménages et chaque type de trajet, identiques pour toutes les zones de résidence, et constants dans le temps. Le facteur de charge moyen des voitures (moyenne pondérée) change avec le temps, du fait du changement de structure des ménages par catégories.

Les **intrants** spécifiques de ce module sont:

- les niveaux de saturation de l'équipement automobile des ménages, par zone de résidence et par catégorie de ménages,
- l'élasticité constante de la fonction logistique liant le taux d'équipement à l'aisance individuelle,
- la distance annuelle de parcours des voitures selon les zones de résidence des propriétaires de voitures,
- les facteurs de charge des voitures par catégorie de ménages et le type de trajet.

Ses **résultats** sont:

- les taux d'équipement automobile des ménages, par zone de résidence et par catégorie de ménages,
- le stock de voitures par zone de résidence, globalement et par catégorie de ménage,
- le stock total de voitures,
- les trafics des voitures (en véhicules-km et passagers-km) par zone de résidence et globalement.

3.3.3. Equilibre global temps-vitesse-distance pour les passagers

L'objectif de ce module est de déterminer simultanément les trafics passagers et leur répartition modale, la vitesse moyenne de mouvement et les vitesses moyennes spécifiques des différents modes alternatifs, et le temps de transport passé dans les différents modes.

Pour la mobilité quotidienne (trajets urbains et régionaux), le temps total passé dans les transports est donné par le sous-modèle "utilisation du temps". Pour les voyages longue distance, le temps passé dans les transports résulte du temps passé dans la fonction "accomplissement de soi" (résultat du sous-modèle "utilisation du temps"), et de la part des loisirs à longue distance dans l'augmentation du temps consacré à cette fonction.

L'augmentation de la vitesse moyenne de mouvement des personnes est calculée à partir de l'indice de la production économique réelle, avec une élasticité faisant l'objet d'une hypothèse pour chaque période de temps (qui peut être différente de l'élasticité historiquement mesurée selon des scénarios). Cette vitesse moyenne de mouvement permet de calculer le trafic total de passagers (vitesse x budget-temps x population).

La vitesse moyenne des voitures fait d'abord l'objet d'une hypothèse, laquelle est ensuite affinée à travers un processus itératif visant à établir une cohérence stricte entre la vitesse moyenne de la voiture et les vitesses spécifiques de la voiture pour chaque type de trajets (urbain, régional et longue distance ; voir ci-dessous, section 3.4). Cette vitesse moyenne permet de calculer le budget-temps de transport dépensé dans les voitures (circulation automobile en passagers-km / vitesse en moyenne).

La vitesse moyenne des modes doux est supposée constante (valeur historique). Le temps passé en modes doux est une hypothèse exogène qui est utilisée pour spécifier l'importance des modes doux dans les divers scénarios. Le trafic total des modes doux est calculé comme le produit de la vitesse, du temps passé et de la population.

Le temps passé dans les transports publics est la différence entre le budget-temps de transport total et les temps de transport dépensés dans les voitures et les modes doux. Le trafic total en transports publics est également la différence entre le trafic passagers total et ceux des voitures (en passagers-km) et des modes doux. La vitesse moyenne des transports publics est calculée comme le trafic total dans les transports publics par habitant divisé par le temps passé dans les transports publics.

Les **intrants** spécifiques de ce module sont:

- l'élasticité de la vitesse moyenne de mouvement des personnes à la production économique réelle
- la vitesse moyenne des voitures (hypothèse initiale) et des modes doux
- le temps de transport quotidien dépensé dans les modes doux

Ses **résultats** sont:

- le trafic passager total (passagers-km),
- les trafics passagers en transports publics et modes doux (en passagers-km),
- le budget-temps quotidien en voiture et dans les transports publics,
- la vitesse moyenne de déplacement en transports publics.

3.3.4. Equilibre temps-vitesse-distance pour les passagers, par type de trajet

L'objectif de ce module est de déterminer simultanément la répartition modale des trafics passagers pour les trois types de trajets (urbain, régional, longue distance), les vitesses spécifiques des différents modes concurrents sur les trois types de trajets, et les distances parcourues par les passagers dans les trois types de trajets.

Pour les déplacements urbains et régionaux⁵, les distances parcourues par jour et par habitant sont calculées comme les moyennes pondérées des distances quotidiennes parcourues par les personnes vivant dans les quatre zones de résidence. Dans chaque zone, la distance quotidienne parcourue par habitant pour les trajets urbains et régionaux est supposée changer d'une période à l'autre, sur la base d'une hypothèse exogène. Cette hypothèse tente de saisir les changements dans les répartitions spatiales des lieux de travail et des fonctionnalités urbaines résultant des politiques d'aménagement de l'espace et d'urbanisation. Ces distances parcourues permettent ensuite de calculer les trafics passagers totaux par types de trajet : pour les déplacements urbains et régionaux, elles sont calculées comme les produits des distances parcourues par les populations (km/an/cap x population) ; le trafic longue distance est alors calculé comme la différence entre le trafic total des passagers (voir ci-dessus), moins les trafics urbains et régionaux.

Les parts de la voiture dans les passagers-km urbains et régionaux font aussi l'objet d'hypothèses exogènes, lesquelles dépendent de la zone de résidence. Ces hypothèses tentent de saisir les impacts des politiques urbaines et des politiques de transport sur l'utilisation des voitures (utilisation des infrastructures routières, disponibilité et péages du stationnement, péages routiers et urbains, etc...), selon les zones de résidence.

Elles permettent de calculer les trafics passagers en voiture par types de trajet : pour les déplacements urbains et régionaux, ils sont calculés comme les produits des trafics passagers totaux par les parts de la voiture dans ces trafics (passagers-km x % voitures). Le trafic longue distance en automobile (en passagers-km) est alors calculé comme la différence entre le trafic total en voiture (en passagers-km, voir ci-dessus) moins les trafics urbains et régionaux.

Les voitures ont des vitesses spécifiques pour chaque type de trajet : ces vitesses, et les trafics de passagers en voiture calculés ci-dessus pour chaque type de trajet, permettent le calcul des temps de transport dépensés dans les voitures pour les trois types de trajets. La somme de ces temps doit être compatible (identique) avec le temps globalement passé dans les voitures tel que calculé plus haut (section 3.3). La vitesse spécifique de la voiture sur les trajets longue distance fait l'objet d'une hypothèse exogène qui cherche à saisir l'impact des limites de vitesse sur les routes et autoroutes. La recherche de cohérence (équilibre de premier ordre) consiste à ajuster les vitesses spécifiques de la voiture sur les autres trajets et sa vitesse globale moyenne, dans un processus itératif, jusqu'à ce que la vitesse globale moyenne de la voiture et le temps global passé dans les voitures cadrent avec les vitesses spécifiques et les temps passés pour chaque type de trajets.

Les modes doux sont utilisés seulement pour les trajets urbains : leur vitesse moyenne, et le trafic de passagers et le temps passé connexes, ont déjà été calculés plus haut (voir ci-dessus).

Les temps de transport passés dans les trajets urbains, régionaux et longue distance sont déterminés par les trafics passagers correspondant à ces types de trajet (voir ci-dessus) et les vitesses moyennes pour chacun d'eux. La somme de ces temps doit être compatible (identiques) au budget-temps total de transport tel que calculé plus haut (section 3.3). Comme pour les voitures, les vitesses des modes de transport public à longue distance sont exogènes et spécifiques des modes : route, ferroviaire normal, ferroviaire à grande vitesse, avion. La recherche de cohérence (équilibre de deuxième niveau) consiste en un ajustement a) des vitesses de déplacement pour les trajets urbains et régionaux et b) de la part des modes de transport public à longue distance. Cet ajustement se fait par un processus itératif jusqu'à ce que la vitesse moyenne de déplacement en transports publics et le temps globalement passé dans les transports publics, cadrent avec les vitesses et les temps passés dans les transports publics pour chaque type de trajets.

⁵ Le trajet urbain est défini comme tout trajet intérieur ou traversant les villes-cœur, les 1ère couronnes et les villes petites et moyennes, ainsi que les trajets entre villes-cœur et 1ère couronne. Les trajets régionaux correspondent à tous les autres trajets quotidiens.

En principe, ces procédures itératives de mise en cohérence peuvent conduire à un ensemble de solutions d'équilibre différentes. Dans la pratique, lorsqu'on ajoute la recherche d'équilibres temps-vitesse-distance pour chaque zone de résidence (voir 3.5), l'ensemble des solutions pour les équilibres globaux apparaît très réduit.

Une fois les trafics passagers en voitures par type de trajet calculés, le module calcule la circulation des voitures par type de trajets (en véhicules-km) en divisant les passagers-km par les facteurs de charge respectifs de chaque type de trajet. Comme expliqué plus tôt, les facteurs de charge sont spécifiques des catégories de ménages et types de trajet, et constants dans le temps. Les facteurs de charge moyen des voitures (moyennes pondérées) changent avec le temps, du fait des changements dans la structure des ménages par catégories. Les facteurs de charge moyens par types de trajet sont supposés changer au fil du temps de la même façon que le facteur de charge moyen d'ensemble.

Les **intrants** spécifiques de ce module sont:

- la variation relative de la distance quotidienne parcourue par habitant pour les trajets urbains et régionaux, selon les zones de résidence,
- la part de la voiture dans les trafics passagers urbain et régional, par zone de résidence,
- les vitesses spécifiques des modes de transport en longue distance.

Ses **résultats** sont:

- le trafic total de passagers (passagers-km) par type de trajets,
- les trafics passagers par mode et type de trajets (en passagers-km),
- les trafics des voitures par type de trajets (en véhicules-km),
- la ventilation du budget-temps individuel de transports par type de trajet et par mode,
- les vitesses moyennes de déplacement par type de trajets,
- la vitesse moyenne de déplacement en voiture pour les déplacements urbains et régionaux,
- la distance annuelle moyenne parcourue en trajets longue distance, par habitant.

3.3.5. Equilibre temps-vitesse-distance pour les passagers, par type de trajet et zone de résidence

L'objectif de ce module est de déterminer simultanément, pour chaque zone de résidence, la répartition modale des trafics passagers pour les déplacements urbains et régionaux, les vitesses spécifiques des différents modes concurrents sur les différents trajets, et les distances parcourues par les passagers par mode et type de trajet.

Comme on l'a dit plus haut, dans chaque zone de résidence, la distance quotidienne parcourue par habitant pour les trajets urbains et régionaux change d'une période à l'autre, et cette variation fait l'objet d'une hypothèse exogène. Ces distances permettent le calcul des trafics passagers totaux pour les déplacements urbains et régionaux, selon les zones de résidence (km/an/cap x population).

Les parts de la voiture dans les passagers-km urbains et régionaux font aussi l'objet d'hypothèses exogènes, lesquelles dépendent de la zone de résidence, et qui permettent le calcul des trafics passagers en voiture pour les trajets urbains et régionaux (passagers-km x % voitures), selon les zones de résidence.

Les modes doux ne sont utilisés que pour les trajets urbains : leur vitesse moyenne est supposée identique pour toutes les zones de résidence ; le temps passé dans chaque zone est supposé changer au même rythme que la moyenne (voir ci-dessus, section 3.3) ; la distance moyenne parcourue par habitant dans les modes doux est donc calculée comme le temps passé divisé par la vitesse. Ceci permet le calcul des passagers-km dans les modes doux par zone de résidence (km/an/habitant x population).

Les passagers-km dans les transports publics sont alors calculés par solde des trafics passagers totaux dans les déplacements urbains et régionaux moins les passagers-km en voiture, moins les passagers-km en modes doux (uniquement pour les déplacements urbains).

Les vitesses moyennes de déplacement en voitures et transports publics pour les trajets régionaux sont considérées comme identiques pour tous les habitants, quelle que soit leur zone de résidence, égales aux moyennes résultant de la procédure itérative décrite plus haut (section 3.4). Idem pour les modes doux pour les trajets urbains. En revanche, les vitesses moyennes de déplacement en voiture et transports publics pour les trajets urbains varient selon les zones de résidence. L'ensemble de ces données sur les vitesses moyennes et les trafics, pour les voitures, les modes doux et les transports publics, pour les déplacements urbains et régionaux, permettent de calculer les temps passés dans les transports par mode et type de trajet, pour chaque zone de résidence. La somme de ces temps doit être compatible (identique) au budget-temps de transports quotidien, dans chaque zone de résidence.

Pour chaque zone, la recherche de cohérence (équilibre de troisième niveau), consiste à ajuster les vitesses de déplacement en voiture et en transports publics pour les déplacements urbains. Cet ajustement se fait dans un processus itératif jusqu'à ce que les budget-temps quotidiens de transport cadrent avec les vitesses et les temps passés dans chaque mode pour chaque type de trajet.

Les **intrants** spécifiques de ce module sont:

- la variation relative de la distance quotidienne parcourue par habitant pour les déplacements urbains et régionaux, selon les zones de résidence,
- Les parts de la voiture dans les passagers-km urbains et régionaux, par zone de résidence.

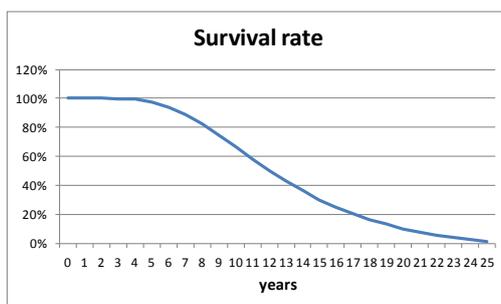
Ses **résultats** sont:

- les trafics passagers urbains et régionaux totaux (passagers-km), par zone de résidence,
- les trafics passagers urbain et régionaux par mode et par zone de résidence (en passagers-km),
- la ventilation du budget-temps de transport quotidien par type de trajet et par mode, pour chaque zone de résidence,
- les vitesses moyennes de déplacement en voiture et en transports publics, pour les déplacements urbains, par zone de résidence.

3.3.6. TILT, simulation du parc de voitures

L'objectif de ce module est de simuler l'évolution de la structure du parc voiture selon l'âge, la technologie et l'énergie (voir la section 3.2 pour le calcul du parc total de voiture).

La simulation de l'évolution de la structure par âge est basée sur une « loi de survie » qui donne le pourcentage d'une classe d'âge qui subsiste après un certain nombre d'années. C'est une fonction de log-normale, illustrée par le graphique ci-dessous :

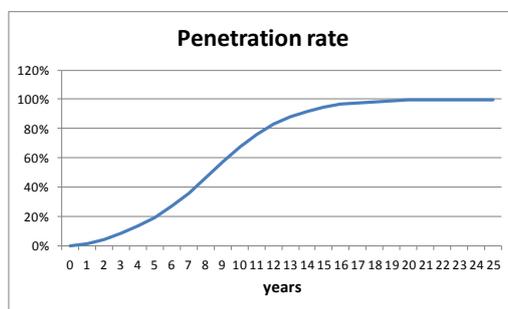


Trois paramètres déterminent l'allure de cette courbe : deux paramètres structuraux constants calibrés sur des séries chronologiques historiques, et la durée de vie moyenne, susceptible de changer au cours du temps pour saisir le vieillissement du stock de voiture.

Cette loi est appliquée à tous les millésimes du parc de voitures (millésime = année de la première immatriculation), répartis par technologie et par énergie. Elle permet de calculer le parc de voitures de l'année t qui existe toujours à l'année $T + 1$, pour chaque millésime/technologie/énergie et pour l'ensemble du parc. Elle permet aussi le calcul du nombre de nouvelles immatriculations entre t et $T + 1$ (nouveau millésime), par différence entre le parc total de voitures à l'année $T + 1$ moins le parc de voitures de l'année t qui existe toujours à l'année $T + 1$.

La simulation de l'évolution de la structure du parc par technologie et énergie est partiellement basée sur la loi de survie ci-dessus, en partie sur l'allocation des nouvelles immatriculations entre technologies et énergies concurrentes. Cette allocation est basée sur des fonctions de diffusion technologique (courbe en S), avec des niveaux de saturation prédéfinis. Elle est illustrée par le graphique ci-dessous :

:



Trois paramètres déterminent l'allure de cette courbe : le niveau de saturation (100 % dans la courbe ci-dessus), la vitesse avec laquelle le niveau de saturation est atteint, l'angle au point d'inflexion. Le niveau de saturation dépend seulement de la technologie au regard des utilisations possibles des voitures (principalement pour saisir les voitures spécifiquement urbaines). La vitesse et l'angle au point d'inflexion dépendent de l'ampleur de l'innovation technologique : courbe plutôt plate pour les modifications profondes de la technologie, plutôt raides pour des modifications mineures de la technologie.

Sont considérées comme technologies concurrentes: les moteurs à combustion interne (MCI) avec combustibles liquides ou gazeux, les voitures électriques pures, les voitures hybrides rechargeables bi-énergies (électricité + combustible liquide ou gazeux), les piles à combustible (soit alimenté directement avec de l'hydrogène distribué ou via un réformateur embarqué fonctionnant au gaz naturel ou au méthanol). Les énergies concurrentes sont: les combustibles liquides (essence et diesel avec additifs bio), les combustibles gazeux (gaz naturel comprimé ou liquéfié, GPL, hydrogène comprimé ou liquéfié), l'électricité.

Les **intrants** spécifiques de ce module sont:

- le changement annuel de la durée de vie moyenne des voitures,
- la niveaux de saturation par technologie / énergie,
- l'angle de la vitesse et l'inflexion des courbes de diffusion technologique.

Ses **résultats** sont:

- les parcs de voitures (circulantes) selon l'âge et la technologie / énergie.

3.3.7. TILT, trafic des voitures par types de trajet et technologie / énergie

Le but de ce module est de simuler l'évolution de la structure de la circulation automobile en véhicules-km selon le type de trajet et selon la technologie / énergie des voitures (voir la section 3.2 pour le calcul du trafic total des voitures en véhicules-km).

Toutes les technologies / énergies concurrentes ne sont pas identiques au regard des divers types d'utilisation de la voiture : les voitures électriques sont manifestement pertinentes pour les déplacements urbains, mais pas pour les trajets interurbains, par exemple. De même, lorsqu'un ménage possède plus d'une voiture, le mode d'utilisation des deux (ou plus) voitures est différent : la première voiture (1^{er} équipement) doit correspondre à toutes les utilisations, tandis que les autres (2^e - ou plus-équipement) sont principalement utilisées pour des trajets urbains et régionaux quotidiens. En d'autres termes, la distance moyenne parcourue annuellement n'est pas identique pour tous les types de voitures, mais dépend de la technologie / énergie utilisée et du statut de propriété (1^{er} versus 2^{ème} - ou plus-équipement).

Afin de tenir compte de ces spécificités, le module simule en deux étapes. Tout d'abord il alloue le parc de voitures par technologie / énergie calculé ci-dessus (voir 3.6) entre premier et deuxième (ou plus) équipement. Ensuite, il calcule le kilométrage annuel de toutes les catégories de voitures, compte tenu de la structure de l'utilisation de la voiture par catégorie.

3.3.7.1. Répartition du parc de voitures par technologies / énergies, selon le statut de propriété

Dans un premier temps, le module fractionne le parc de voitures selon les deux statuts de propriété: les voitures correspondant au premier équipement des ménages et celles correspondant au deuxième (ou plus) équipement des ménages. Cela se fait en considérant que pour les ménages avec deux ou plusieurs adultes, le niveau de saturation pour le premier équipement est de 100 %, et que pour les autres ménages (un seul adulte), il n'y a aucun deuxième (ou plus) équipement.

In a second step, the module splits each car stock corresponding to the first and second (or more) equipment by technology / energy. The logic of this allocation is as follows.

Dans une deuxième étape, le module divise chaque parc de voitures correspondant au premier et au deuxième (ou plus) équipement, par technologie / énergie. La logique de cette répartition est la suivante.

Voitures électriques

Les voitures électriques sont supposées être des voitures strictement urbaines, correspondant uniquement au deuxième (ou plus) équipement ; le parc total de voitures électriques est donc attribué voitures de deuxième (ou plus) équipement.

Voitures à pile à combustible

Les voitures équipées de piles à combustible fonctionnant à l'hydrogène (PAC-H²), le cas échéant, sont censées être d'abord des voitures urbaines, d'abord allouées au 2^{ème} (ou plus) équipement. Si le parc total de voitures PAC-H² est plus petit que la différence entre le parc total de voitures correspondant au deuxième (ou plus) équipement moins les voitures électriques, alors le parc entier de PAC-H² est alloué au deuxième (ou plus) équipement. Si ce n'est pas le cas, cette différence est entièrement couverte par les voitures PAC-H² et l'excédent de voitures PAC-H² est alloué au premier équipement.

Les voitures équipées de piles à combustible fonctionnant avec un réformeur au méthanol ou au gaz naturel (PAC-M, PAC-GN), le cas échéant, sont présumées également être d'abord des voitures

urbaines et d'abord attribuées au deuxième (ou plus) équipement. Si le parc total de PAC-M et PAC-GN est plus petit que la différence entre le parc total de voitures correspondant au deuxième (ou plus) équipement moins les voitures électriques et voitures PAC-H², alors le parc entier est alloué au deuxième (ou plus) équipement. Si ce n'est pas le cas, cette différence est entièrement couverte par les PAC-M et PAC-GN, et le surplus de voitures PAC-M et PAC-GN est alloué au 1er équipement. La proportion de PAC-M par rapport aux PAC-GN est supposée la même pour les premier et deuxième (ou plus) équipement.

Voitures hybrides rechargeables ("plug-in")

De même, les voitures hybrides rechargeables alimentées à l'hydrogène (Hyb-H²) sont censées être d'abord des voitures urbaines, d'abord allouées au 2ème (ou plus) équipement. Si le parc total de Hyb-H² est plus petit que la différence entre le parc total de voitures correspondant au deuxième (ou plus) équipement moins les voitures électriques et voitures à pile à combustible, alors le parc entier de Hyb-H² est alloué au deuxième (ou plus) équipement. Si ce n'est pas le cas, cette différence est entièrement couverte par les Hyb-H², et le surplus de voitures Hyb-H² est alloué au 1er équipement. Idem pour les voitures hybrides rechargeables alimentées au gaz naturel (Hyb-GN). Si le parc total de Hyb-GN est plus petit que la différence entre le parc total de voitures correspondant au deuxième (ou plus) équipement moins les voitures électriques, voitures à pile à combustible et Hyb-H², alors le parc entier de Hyb-GN est alloué au deuxième (ou plus) équipement. Si ce n'est pas le cas, cette différence est entièrement couverte par les Hyb-GN, et le surplus de voitures Hyb-GN est alloué au 1er équipement.

Les autres voitures hybrides rechargeables, c'est-à-dire celles alimentées en essence, gazole ou GPL sont modélisées de la même façon : tout d'abord attribuées au deuxième (ou plus) équipement, et, si la différence entre le parc total de voitures correspondant au deuxième (ou plus) équipement moins les voitures électriques, voitures à pile à combustible et hybrides H² et GN, est plus petite que le parc total des autres voitures hybrides rechargeables, alors le surplus est alloué au 1er équipement. La proportion d'essence, de gazole et de GPL dans les autres voitures hybrides rechargeables est supposée la même pour les premier et deuxième (ou plus) équipements.

Voitures avec MCI

Une logique similaire est utilisée pour modéliser l'attribution des voitures à moteurs à combustion interne (MCI) entre le 1er et le deuxième (ou plus) équipement: compléter d'abord le parc correspondant au 2ème équipement le cas échéant, puis allouer le surplus de MCI au 1er équipement.

Dans ce cas, les ordres de priorité pour l'attribution au 2ème équipement sont: d'abord les MCI hydrogène, puis les MCI gaz naturel, puis les MCI essence, gazole et GPL, conventionnels et avancés, tous ensembles.

3.3.7.2. Trafic (en véhicule-km) des voitures par technologies / énergies et statut de propriété

Déplacements de longue distance

Seules les voitures correspondant au 1er équipement sont réputées être utilisées sur longue distance.

Le trafic longue distance total des voitures (en véhicules-km) calculé plus haut (voir la section 3.4) est d'abord réparti entre technologies et énergies au pro-rata de leurs nombres respectifs dans le parc de voitures correspondant au 1er équipement. Ensuite, les véhicules-km longue distance correspondant à chaque technologie / énergie sont ajustés pour tenir compte de l'impact de l'âge moyen des parcs sur la distance annuelle parcourue.

Déplacements régionaux

Toutes les voitures correspondant au 1er et 2ème (ou plus) équipement, sauf les voitures électriques, sont réputées être utilisées pour les déplacements régionaux, au prorata des parcs respectifs de voitures.

Le trafic total régional des voitures (en véhicules-km) calculé plus haut (voir la section 3.4) est d'abord réparti entre technologies et énergies au prorata des parcs respectifs dans le parc total de voitures moins les voitures électriques. Ensuite, les véhicules-km régionaux correspondant à chaque technologie / énergie sont ajustés pour tenir compte de l'impact de l'âge moyen des parcs sur la distance annuelle parcourue.

Déplacements urbains

Toutes les voitures correspondant au 1er et 2ème (ou plus) équipement sont réputées être utilisées pour les déplacements régionaux, au prorata des parcs respectifs de voitures.

Le trafic total urbain des voitures (en véhicules-km) calculé plus haut (voir la section 3.4) est d'abord réparti entre technologies et énergies au prorata des parcs respectifs dans le parc total de voitures. Ensuite, les véhicules-km urbains correspondant à chaque technologie / énergie sont ajustés pour tenir compte de l'impact de l'âge moyen des parcs sur la distance annuelle parcourue.

3.3.8. TILT, énergie et CO2 pour les voitures

L'objectif de ce module est de simuler l'évolution de la consommation d'énergie par type d'énergie et des émissions de CO2 des voitures.

Chaque technologie est caractérisée par une consommation spécifique d'énergie et des émissions spécifiques de CO2 par véhicule-kilomètre, lesquelles dépendent de l'énergie utilisée, du type de trajet et, pour les MCI conventionnels, des progrès d'efficacité énergétique.

Les carburants à base de pétrole et gaz naturel ont des facteurs d'émission de CO2 (tCO2/toe) standards et constants. Les biocarburants (éthanol, biogaz,...) sont supposés neutres au regard du CO2 (coefficient d'émission = 0). L'électricité et l'hydrogène sont aussi neutres au niveau du véhicule, mais peuvent induire des émissions de CO2 au niveau de leur production : leurs facteurs d'émission indirecte de CO2 dépendent de la structure de leur production.

La consommation d'énergie et les émissions de CO2 sont calculées par le module, en multipliant les trafics des voitures en véhicules-kilomètres par technologie / énergie, par les consommations spécifiques d'énergie respectives par véh-km, et par les émissions spécifiques respectives de CO2, directes et indirectes, par véh-km.

4. Re-quantification des scénarios de mobilité durable

La re-quantification des scénarios de mobilité durable avec VLEEM/TILT spatialisé présentée ci-dessous ne concerne que la composante "passagers" des scénarios de mobilité durable. La composante "marchandises" est traitée séparément, dans la tâche 7 du projet.

On abordera successivement la quantification des hypothèses de scénario et la présentation des nouveaux résultats.

4.1. Quantification / re-quantification des hypothèses des scénarios de mobilité durable

L'esprit général et le contenu détaillé des trois scénarios de mobilité durable sont ceux des scénarios revisités dans la tâche 1 du projet, tenant compte des nouvelles perspectives de crise-croissance économique.

Trois sortes d'hypothèses sont re-quantifiées ci-dessous:

- celles sur les variables exogènes existantes de VLEEM/TILT qui ont été affectées par les améliorations / modifications décrites plus haut (section 3);
- celles sur les nouvelles variables de scénario résultant de la spatialisation de VLEEM/TILT;
- celles résultant de la procédure itérative de recherche d'équilibres temps-vitesse-distance aux trois niveaux décrits plus hauts (procédure de calibration).

4.1.1. Re-quantification des hypothèses sur les variables de scénario existantes

Cette re-quantification a deux origines: les changements dans le formalisme mathématique de VLEEM hors spatialisation, l'accès à de nouvelles données.

Les tableaux ci-dessous indiquent les nouvelles hypothèses considérées, avec les codes suivants.

	Donnée année de base	
	Minimum	
	Maximum	
	Valeur intermédiaire	
	Solde	

4.1.1.1. Tous scénarios

Structures sociales	2000	2025	2050
Zone socio-géographique "urbain"			
% célibataires dans la population [25-75 + ménages <25 ans]	17%	21%	23%
% des [25-50] + ménages<25 vivant en couple sans enfant	16%	19%	19%
% population >75 vivant avec leurs enfants ou en communauté	5%	5%	5%
% population [25-49] en ménage monoparental avec un seul enfant	8%	7%	8%
Zone socio-géographique "rural"			
% célibataires dans la population [25-75 + ménages <25 ans]	7%	21%	23%
% des [25-50] + ménages<25 vivant en couple sans enfant	22%	25%	25%
% population >75 vivant avec leurs enfants ou en communauté	5%	5%	5%
% population [25-49] en ménage monoparental avec un seul enfant	5%	5%	5%

4.1.1.1. Hypothèses par scénario

Module information-éducation	2000	2025		2050		PEGASE		CHRONOS		HESTIA	
		Min	Max	Min	Max	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Taux de participation à l'enseignement supérieur des [25-45]	26%	51%	51%	71%	76%	51%	76%	51%	71%	51%	71%

Module voitures	2000	2025		2050		PEGASE		CHRONOS		HESTIA	
		Min	Max	Min	Max	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Augmentation relative du taux de remplissage des VP du fait du covoiturage											
tous déplacements		0%	2%	0%	5%	0%	0%	1%	3%	2%	5%

Module équilibre temps-vitesse-distance de niveau2	2000	2025		2050		PEGASE		CHRONOS		HESTIA	
		Min	Max	Min	Max	2025	2050	2025	2050	2025	2050
part de la mobilité longue distance dans l'accroissement du budget-temps pour "accomplissement de soi"		0%	10%	0%	10%	0%	0%	10%	10%	5%	5%
part de l'aérien dans les pkm longue distance (intérieur)	5%	7%	15%	5%	25%	15%	25%	7%	5%	7%	5%

4.1.2. Nouvelles hypothèses liées à la spatialisation

4.1.2.1. Tous scénarios

Urbanisation	2000			2025			2050		
	cœur de ville	1ère couronne	autres villes	cœur de ville	1ère couronne	autres villes	cœur de ville	1ère couronne	autres villes
Ménages migrants									
M1 - Célibataires	10%	70%	20%	10%	70%	20%	10%	70%	20%
M2 - Couples sans enfant	10%	70%	20%	10%	70%	20%	10%	70%	20%
M3 - Monoparental, 1 enfant	10%	70%	20%	10%	70%	20%	10%	70%	20%
M4 - Familles >2 pers.	10%	70%	20%	10%	70%	20%	10%	70%	20%

4.1.2.1. Hypothèses par scénario

Spatialisation de la population	2000	2025		2050		PEGASE		CHRONOS		HESTIA	
		Min	Max	Min	Max	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Part de la population en habitat diffus	30%	28%	34%	25%	38%	34%	38%	31%	32%	28%	25%
Distribution des ménages urbains selon les zones urbaines											
M1 - Célibataires											
cœur de ville	40%	36%	44%	32%	48%	40%	40%	44%	48%	36%	32%
1ère couronne	36%	32%	40%	28%	44%	40%	44%	31%	25%	32%	28%
autres villes	24%	19%	32%	14%	40%	20%	16%	26%	27%	32%	40%
M2 - Couples sans enfant											
cœur de ville	27%	25%	30%	23%	35%	28%	29%	30%	35%	25%	23%
1ère couronne	43%	39%	47%	35%	52%	47%	52%	38%	32%	39%	35%
autres villes	31%	28%	36%	25%	42%	26%	19%	32%	34%	36%	42%
M3 - Monoparental, 1 enfant											
cœur de ville	30%	27%	35%	24%	40%	31%	32%	35%	40%	27%	24%
1ère couronne	46%	41%	51%	36%	55%	51%	55%	40%	33%	41%	36%
autres villes	24%	19%	32%	15%	40%	18%	13%	26%	28%	32%	40%
M4 - Familles >2 pers.											
cœur de ville	22%	20%	24%	18%	26%	22%	22%	24%	26%	20%	18%
1ère couronne	50%	45%	53%	40%	56%	53%	56%	47%	44%	45%	40%
autres villes	28%	23%	35%	18%	42%	25%	22%	29%	30%	35%	42%

Module "usage du temps"	2025		2050		PEGASE		CHRONOS		HESTIA		
	2000	Min	Max	Min	Max	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Budget-temps de transport quotidien (h/jour/personne >6 ans)											
cœur de ville	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
1ère couronne	0,92	0,92	0,97	0,92	1,01	0,92	0,92	0,97	1,01	0,92	0,92
autres villes	0,91	0,91	1,00	0,91	1,10	0,91	0,91	1,00	1,10	0,91	0,91
habitat diffus	0,82	0,82	0,95	0,82	1,07	0,82	0,82	0,95	1,07	0,82	0,82

Module "voiture"	2025		2050		PEGASE		CHRONOS		HESTIA		
	2000	Min	Max	Min	Max	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Niveau de saturation de l'équipement automobile des ménages											
Cœur de ville											
M1 - Célibataires	50%	40%	53%	39%	52%	53%	52%	40%	39%	47%	39%
M2 - Couples sans enfant	111%	90%	120%	90%	120%	120%	120%	90%	90%	105%	90%
M3 - Monoparental, 1 enfant	77%	67%	90%	67%	90%	90%	90%	67%	67%	79%	67%
M4 - Familles >2 pers.	145%	133%	167%	100%	167%	167%	167%	133%	100%	150%	100%
1ère couronne											
M1 - Célibataires	57%	53%	60%	52%	59%	60%	59%	53%	52%	57%	52%
M2 - Couples sans enfant	127%	135%	150%	135%	150%	150%	150%	135%	135%	143%	135%
M3 - Monoparental, 1 enfant	88%	90%	100%	90%	100%	100%	100%	90%	90%	95%	90%
M4 - Familles >2 pers.	166%	133%	175%	100%	200%	175%	200%	133%	100%	154%	100%
Autres villes											
M1 - Célibataires	64%	60%	80%	59%	78%	80%	78%	60%	59%	70%	59%
M2 - Couples sans enfant	141%	150%	180%	150%	180%	180%	180%	150%	150%	165%	150%
M3 - Monoparental, 1 enfant	97%	100%	120%	100%	120%	120%	120%	100%	100%	110%	100%
M4 - Familles >2 pers.	184%	167%	200%	167%	220%	200%	220%	167%	167%	183%	167%
Habitat diffus											
M1 - Célibataires	71%	64%	80%	62%	78%	80%	78%	64%	62%	72%	62%
M2 - Couples sans enfant	156%	162%	180%	162%	180%	180%	180%	162%	162%	171%	162%
M3 - Monoparental, 1 enfant	108%	100%	120%	100%	120%	120%	120%	100%	100%	110%	100%
M4 - Familles >2 pers.	205%	200%	210%	200%	220%	210%	220%	200%	200%	205%	200%

Sous-modèle "mobilité"	2025		2050		PEGASE		CHRONOS		HESTIA		
	2000	Min	Max	Min	Max	2025	2050	2025	2050	2025	2050
km par jour par personne en modes doux											
cœur de ville	0,72	0,80	1,00	0,75	1,20	0,80	0,75	0,90	0,98	1,00	1,20
1ère couronne	0,65	0,50	0,70	0,40	1,00	0,50	0,40	0,60	0,70	0,70	1,00
autres villes	0,42	0,45	0,80	0,50	1,00	0,45	0,50	0,63	0,75	0,80	1,00
habitat diffus	0,56	0,30	0,40	0,25	0,50	0,30	0,25	0,35	0,38	0,40	0,50
km/voiture/an											
cœur de ville	13 238	12 000	13 000	10 000	12 000	13 000	12 000	12 000	10 000	12 500	10 000
1ère couronne	17 020	16 500	17 000	15 000	16 500	17 000	16 500	16 500	15 000	16 750	15 000
autres villes	14 605	14 000	14 500	13 000	14 000	14 500	14 000	14 000	13 000	14 250	13 000
habitat diffus	10 827	10 000	11 000	10 000	11 500	11 000	11 500	10 000	10 000	10 500	10 000
% voiture dans la mobilité urbaine (pkm)											
cœur de ville	79%	70%	80%	55%	75%	80%	75%	70%	55%	70%	55%
1ère couronne	88%	80%	90%	65%	85%	90%	85%	80%	65%	80%	65%
autres villes	93%	85%	95%	70%	90%	95%	90%	85%	70%	85%	70%
habitat diffus	43%	40%	50%	35%	60%	50%	60%	40%	35%	40%	35%
% voiture dans la mobilité régionale											
cœur de ville	95%	85%	95%	70%	90%	95%	90%	85%	70%	90%	70%
1ère couronne	95%	85%	95%	70%	90%	95%	90%	85%	70%	90%	70%
autres villes	96%	85%	95%	70%	90%	95%	90%	85%	70%	90%	70%
habitat diffus	96%	85%	95%	70%	90%	95%	90%	85%	70%	90%	70%

4.1.3. Nouveaux équilibres temps-vitesses-distances

4.1.3.1. Equilibre de niveau 1 (voitures)

Module "calibration vitesse-distance"		PEGASE		CHRONOS		HESTIA	
Calibration 1er niveau	2000	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Calibration distance annuelle per capita (% décroissance par période)							
urbain		0%	0%	5%	5%	10%	10%
régional		0%	0%	15%	15%	20%	20%
Vitesses des voitures calibrées (km/h)							
moyenne	28,5	40	39,5	35	29	40	35
urbain	21,6	25	25	22	16	23	18
régional	27,0	37	37	29	22	33	26
longue distance	102,3	105	105	100	90	95	90

4.1.3.2. Equilibre de niveau 2 (tous modes, tous trajets)

Module "calibration vitesse-distance"		PEGASE		CHRONOS		HESTIA	
Calibration 2ème niveau	2000	2025	2050	2025	2050	2025	2050
Vitesses moyennes tous modes calibrées							
urbain		22,8	23,0	20,0	16,0	20,0	16,0
régional		37,5	38,0	30,0	27,0	33,0	31,0
% ferroviaire conventionnel calibré		13%	27%	8%	6%	13%	20%

4.1.3.3. Equilibre de niveau 3 (tous modes, trajets urbains et régionaux par zone))

Module "calibration vitesse-distance"		PEGASE		CHRONOS		HESTIA	
Calibration 3ème niveau		2025	2050	2025	2050	2025	2050
Vitesses moyennes, villes-coeur (km/h)							
Voitures, urbain		21,0	21,0	20,0	18,0	19,0	16,0
TC, urbain		27,0	27,0	27,0	26,0	29,0	23,0
Vitesses moyennes, 1ères couronnes (km/h)							
Voitures, urbain		32,0	32,0	30,0	24,0	28,0	23,0
TC, urbain		30,0	30,0	28,0	35,0	30,0	30,0
Vitesses moyennes, autres villes (km/h)							
Voitures, urbain		27,0	27,00	23,0	15,00	22,0	17,00
TC, urbain		20,0	20,00	20,0	18,00	20,0	15,00
Vitesses moyennes, habitat diffus (km/h)							
Voitures, régional		33,0	33,00	24,0	14,00	28,0	18,00

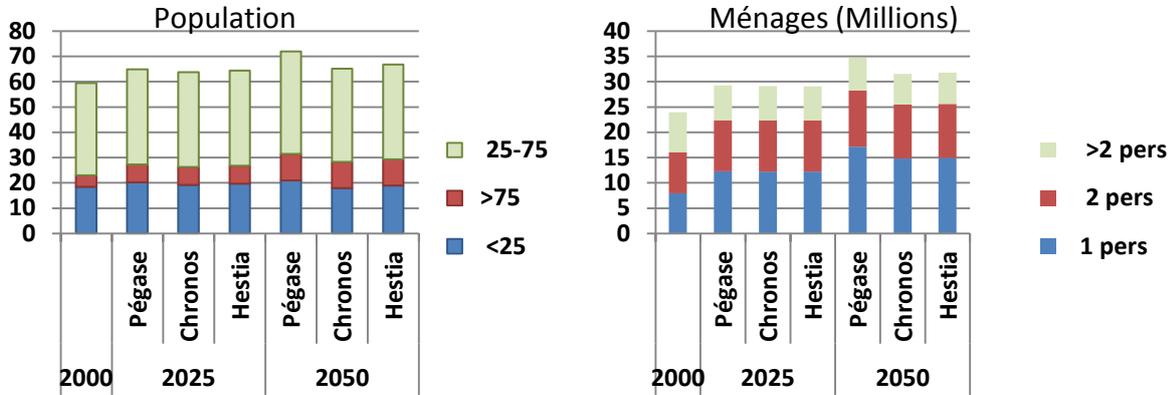
4.2. Nouvelles projections

Les nouvelles projections sont présentées ci-dessous à titre illustratif, sans commentaires ni analyse particulière. Ceux-ci viendront dans la phase finale de la recherche, une fois achevées les tâches 5, 6 et 7.

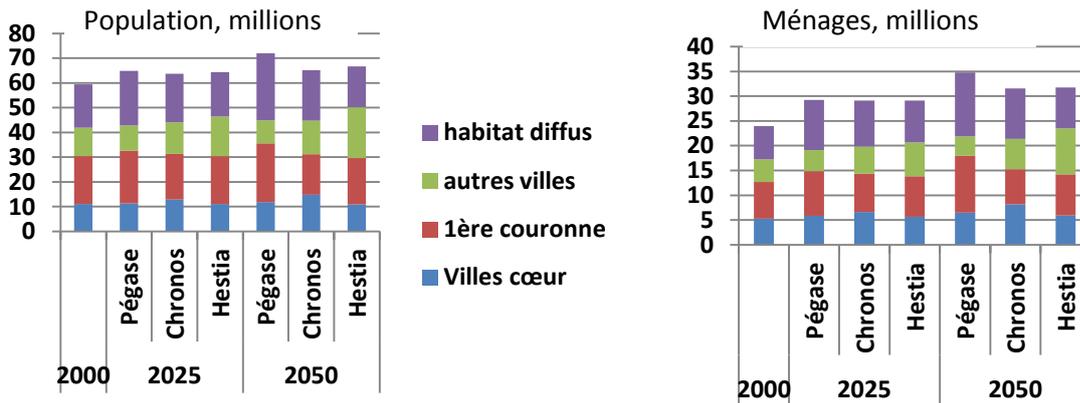
4.2.1. Cadrage socio-économique

Du fait des modifications apportées par la spatialisation, tant les projections démographiques (population, ménages) qu'économiques ont été modifiées et, pour partie spatialisées.

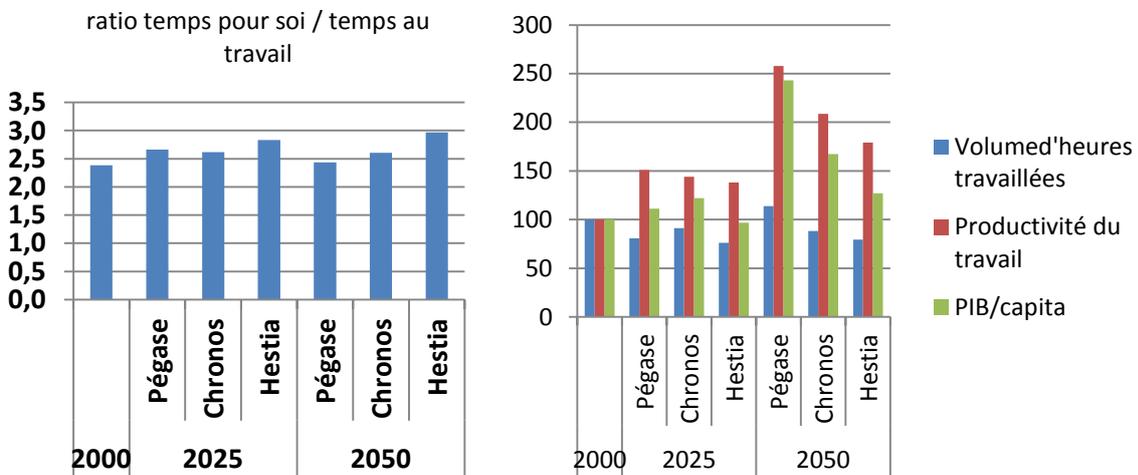
4.2.1.1. Démographie



4.2.1.2. Urbanisation

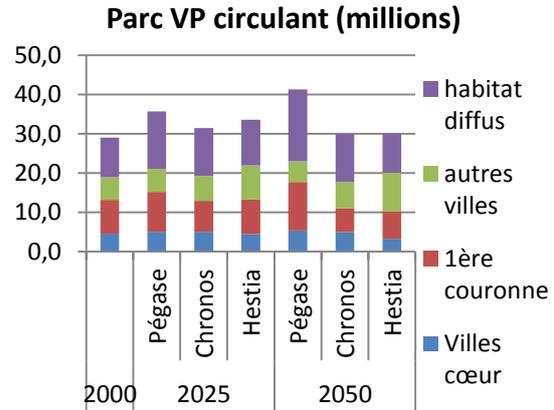
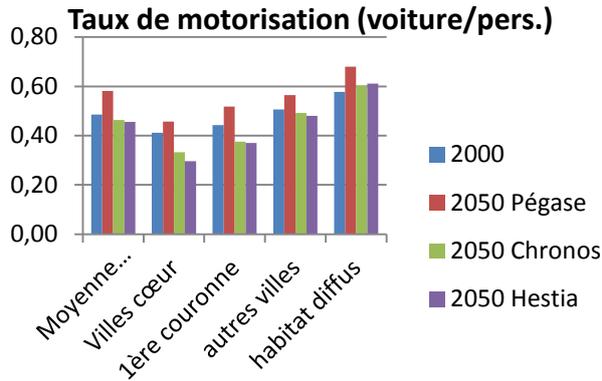


4.2.1.3. Economie

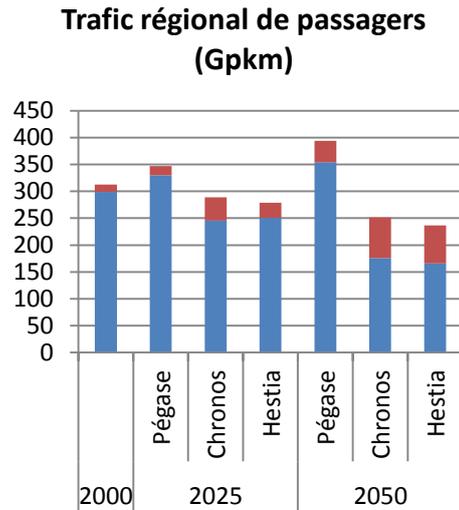
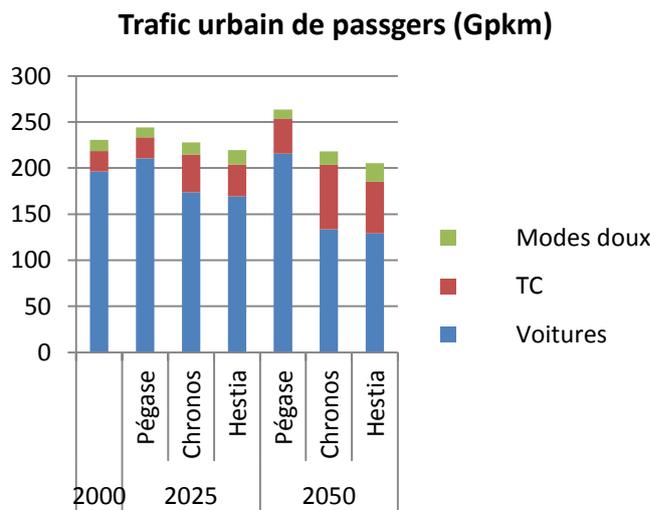
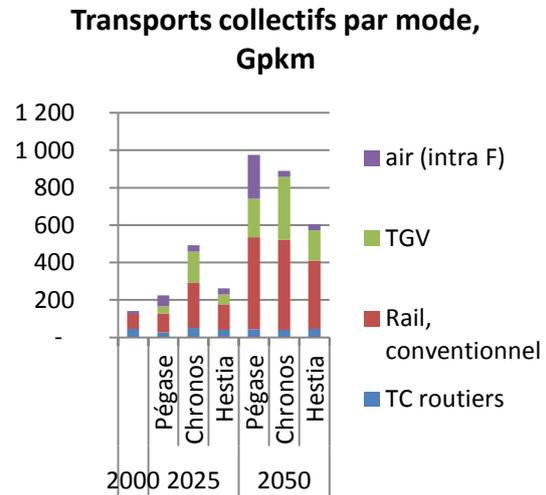
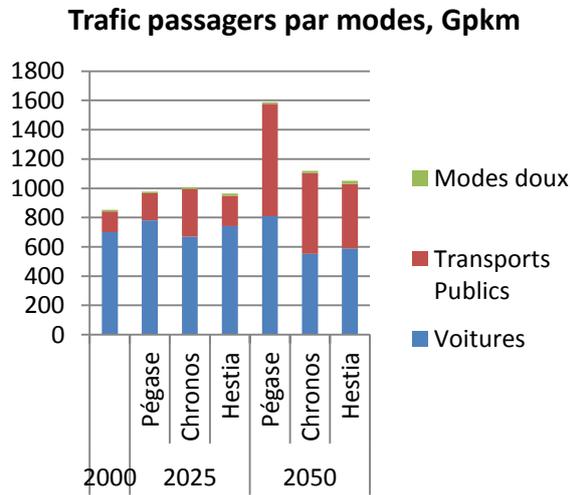


4.2.2. Mobilité, trafics passagers

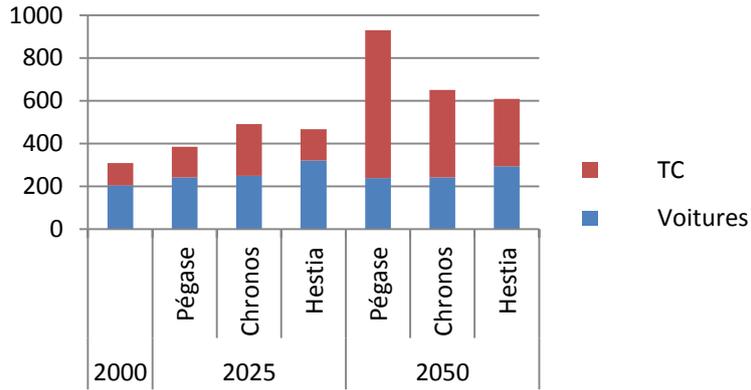
4.2.2.1. Motorisation



4.2.2.2. Trafics passagers

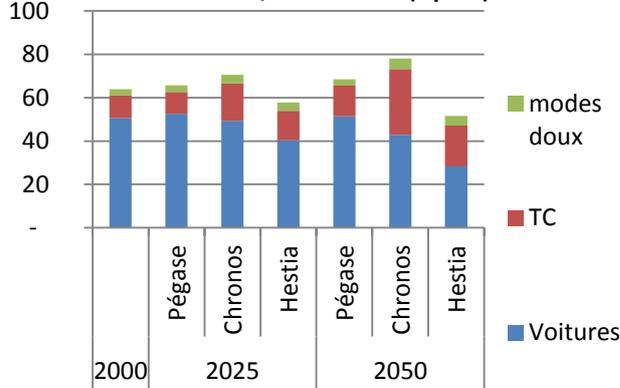


Trafic long-distance de passagers (Gpkm)

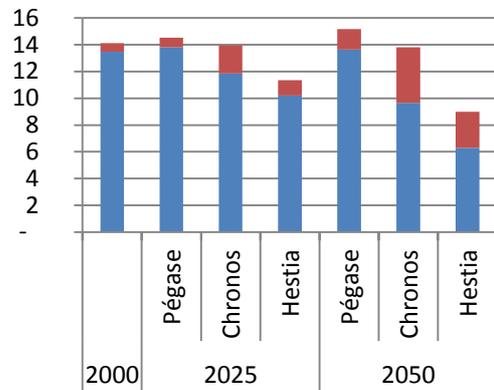


4.2.2.3. Trafics passagers par zone de résidence

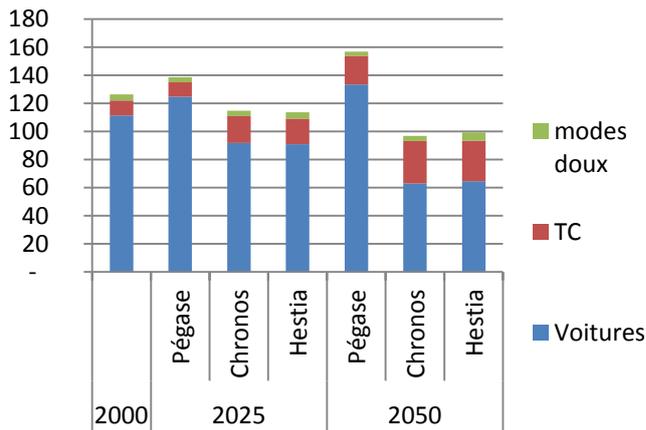
Trafic urbain, villes-coeur (Gpkm)



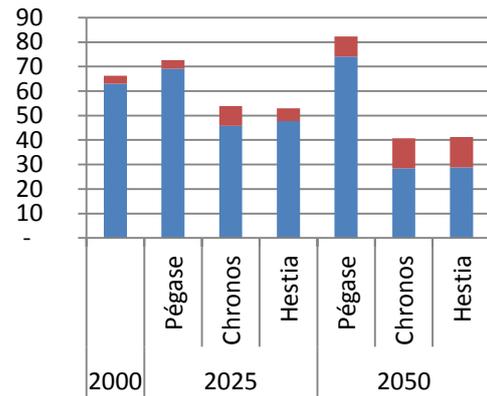
Trafic régional, villes-coeur (Gpkm)

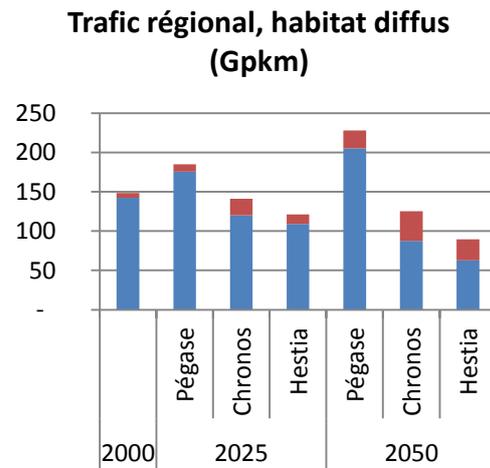
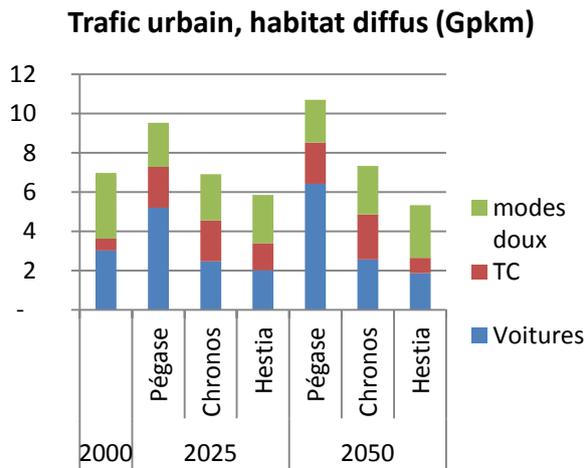
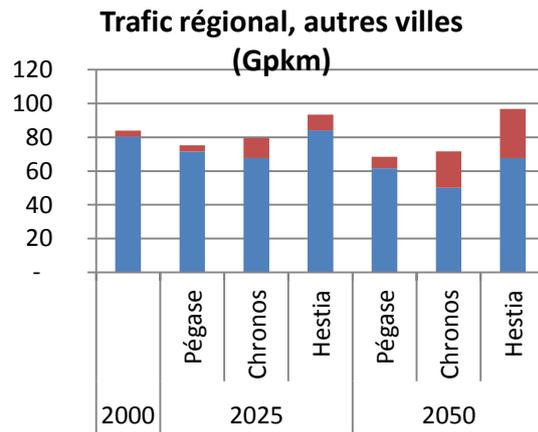
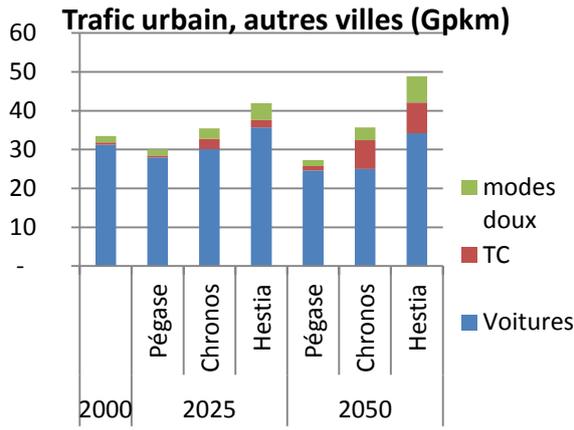


Trafic urbain, 1ère couronne (Gpkm)

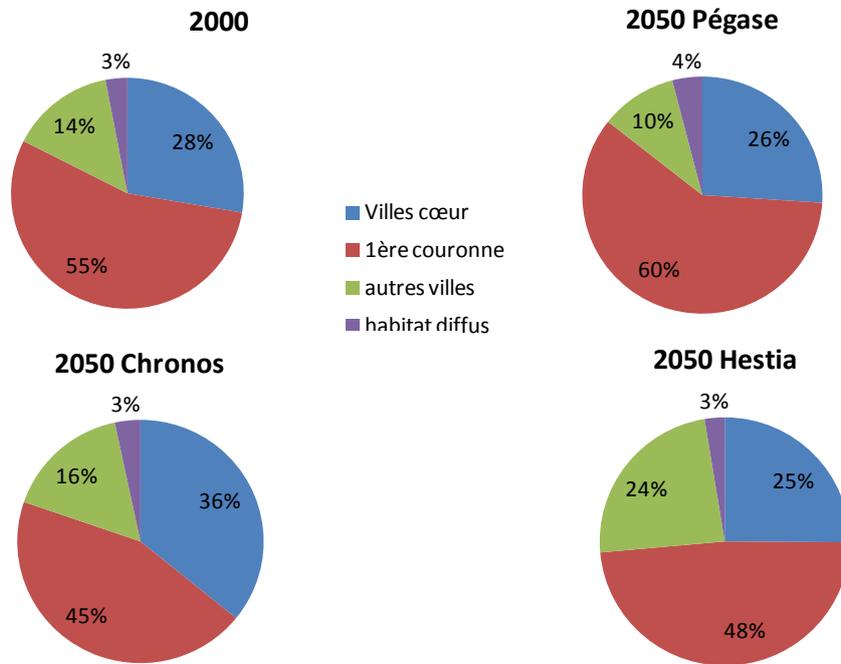


Trafic régional, 1ère couronne (Gpkm)

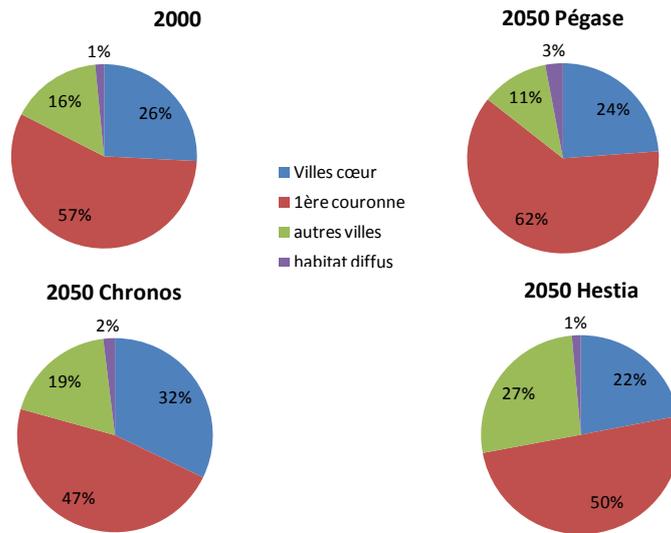




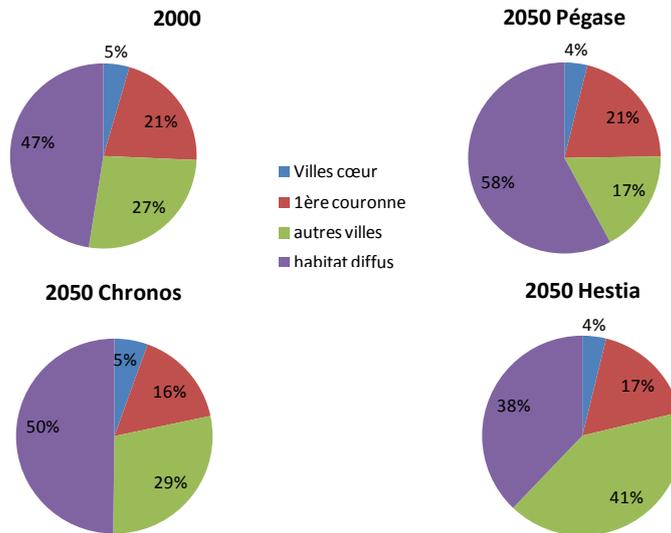
Distribution des trafics urbains de passagers selon les zones de résidence



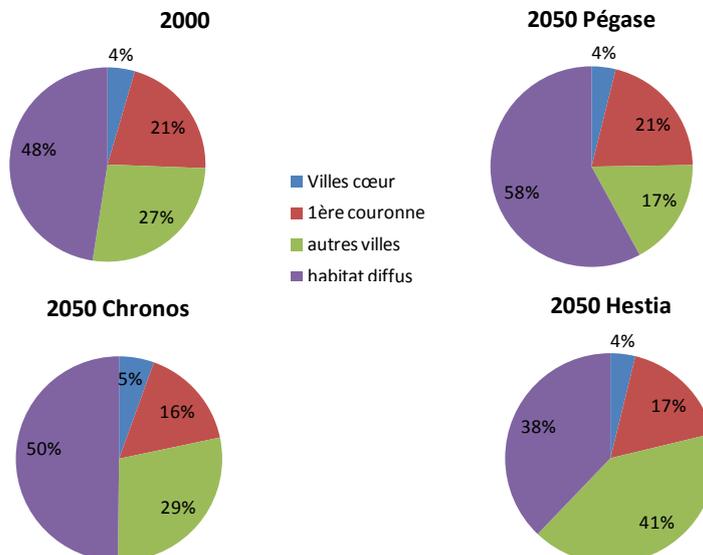
Distribution des trafics urbains de passagers en voiture selon les zones de résidence



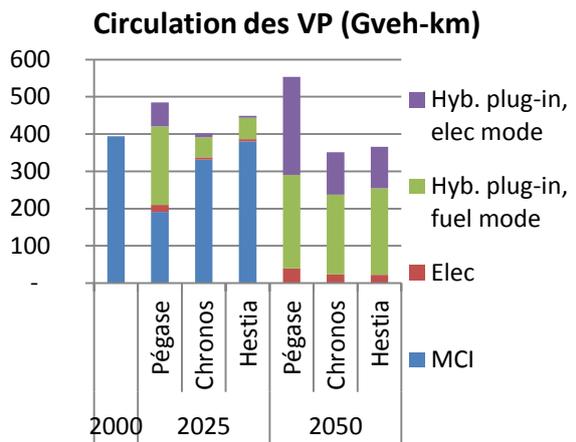
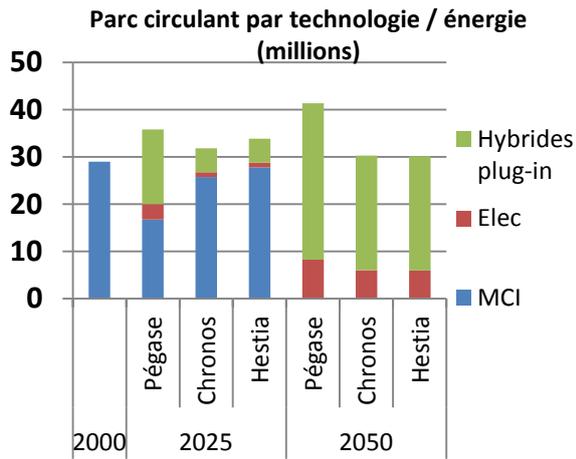
Distribution des trafics régionaux de passagers selon les zones de résidence



Distribution des trafics régionaux de passagers VP selon les zones de résidence



4.2.2.4. Parcs et circulation des voitures par technologie / énergie



4.2.2.5. Energie et CO2 des voitures

