



HAL
open science

Pour une approche économique dans l'élaboration des politiques climatiques locales

Patrick Criqui, Philippe Menanteau, B. Bougnoux, J. Fournier, Mathieu Saujot, H. Joumni

► To cite this version:

Patrick Criqui, Philippe Menanteau, B. Bougnoux, J. Fournier, Mathieu Saujot, et al.. Pour une approche économique dans l'élaboration des politiques climatiques locales: AETIC - Rapport de synthèse (livrable D4.1). [Rapport de recherche] LEPII – EDDEN (coordinateur). 2013, 92 p. hal-01293248

HAL Id: hal-01293248

<https://hal.science/hal-01293248>

Submitted on 24 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÆTIC

Pour une approche économique dans l'élaboration des politiques climatiques locales

Rapport de synthèse (livrable D4.1)

Juin 2013



Coordination : P. Criqui / P. Menanteau (LEPII)
B. Bognoux (Enerdata)
J. Fournier (Veolia)
M. Saujot (IDDRI)
H. Journi (CSTB)

AETIC (une Approche Economique Territoriale Intégrée pour le Climat)

Les villes apparaissent de plus en plus comme des acteurs incontournables pour la réussite de politiques climatiques ambitieuses en raison des nombreux leviers d'action qu'elle détiennent au travers des politiques d'urbanisme et d'aménagement, de transport ou de valorisation des sources d'énergie locales. Les Plans Climat-Energie Territoriaux (PCET) constituent le cadre dans lequel sont définis les objectifs pour l'énergie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle du territoire.

Le but de ce projet est de développer une méthodologie permettant d'identifier et de hiérarchiser les actions à mettre en œuvre dans ces PCET en se basant sur des critères technico-économiques rigoureux. Le choix de la Communauté d'Agglomération de Grenoble comme objet d'étude résulte de l'engagement ancien de l'agglomération dans une démarche de développement durable et en particulier dans l'élaboration d'un PCET qui traduisent une forte motivation sur ces questions, essentielle à la réalisation du projet.

Partenaires du projet :

LEPII – EDDEN (coordinateur)

IDDRI

ENERDATA

CSTB

VEOLIA

PACTE

Le projet AETIC a bénéficié d'une aide de l'ANR dans le cadre du programme Ville Durable

PROJET AETIC – Rapport de synthèse

SOMMAIRE

ABSTRACT	7
I. Introduction :	11
II. Contexte du projet	13
1. Les politiques énergie-climat à l'échelle territoriale	13
2. La nécessité d'une approche coût-efficace	14
3. Le choix de l'agglomération de Grenoble.....	16
III. Points de méthode pour l'élaboration des CMR sectorielles.....	18
1. Une analyse centrée sur trois secteurs d'activité	18
2. La démarche conventionnelle de construction des CMR sectorielles	19
3. Construction de la situation de référence.....	22
4. La question de l'additivité des options techniques.....	23
5. Le calcul du coût des options	26
6. Illustration de la démarche de calcul : les CMR dans le secteur des bâtiments	29
7. Intérêt et limites de l'approche CMR	30
IV. Les scénarios structurants.....	32
1. La modélisation transports – usage des sols (TRANUS)	32
2. Trois directions d'évolution de la forme urbaine	34
3. Les grandes évolutions: population et emplois.....	36
4. Bilan et évolutions des consommations d'énergie et émissions de CO2	39
V. Résultats sectoriels.....	43
1. Le secteur des transports	43
2. Le secteur du bâtiment	55
3. Le secteur de la production / distribution de chaleur.....	64
VI. Approche globale : quels enseignements ?.....	77
1. Intégration des résultats sectoriels	77
2. Quels éléments de conclusion stratégiques ?	82
3. Quels enseignements méthodologiques ?	85
VII. Conclusions sur le projet et perspectives.....	88

ABSTRACT

Ce rapport reprend les principaux éléments figurant dans les différents livrables du projet AETIC de façon à présenter une vision synthétique de l'ensemble de la démarche, des outils utilisés et des résultats obtenus pour chaque secteur et à l'échelle globale. La dernière partie propose une analyse de ces résultats dans le cadre de la politique locale de l'énergie et du climat ainsi qu'une réflexion sur la démarche engagée, son caractère opérationnel et ses limites, et les perspectives ouvertes par cette recherche.

Prendre en compte la dimension de coût-efficacité dans les politiques climatiques locales

La politique climatique des pays de l'Union européenne s'appuie sur une réduction massive des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Cet objectif ambitieux impose de mobiliser l'ensemble des leviers d'action disponibles, notamment à l'échelle locale où des potentiels très importants existent qui ne sont pas directement accessibles par les politiques nationales. Des outils d'analyse et de modélisation existent à l'échelle nationale et internationale afin d'élaborer des politiques climatiques efficaces, mais rien de tel n'existe pour l'instant à l'échelle des territoires. Le projet AETIC permet de définir et mettre en oeuvre une méthodologie nouvelle pour la construction des politiques locales. Cette méthodologie conduit à identifier et hiérarchiser les différentes mesures puis les programmes d'action de réduction coût-efficaces. L'objectif visé est bien de rendre soutenables dans la durée des politiques climatiques de plus en plus ambitieuses, en introduisant le critère d'efficacité économique dans le choix des options à mettre en oeuvre. Le terrain choisi est celui de l'agglomération grenobloise (la METRO) qui s'est engagée depuis plusieurs années dans la réalisation d'un plan climat traduisant une forte volonté politique sur ces questions.

Proposer une approche méthodologique originale

La démarche retenue dans AETIC reproduit celle souvent utilisée à l'échelle nationale ou internationale (courbes de Coûts marginaux de réduction des émissions – CMR). La définition d'une stratégie coût-efficace passe par l'analyse des principales options de réduction dans les secteurs du bâtiment, des transports, et des systèmes énergétiques locaux. La hiérarchisation des actions et la création d'un « ordre de mérite » permet de comparer les résultats et les coûts des différentes actions au sein d'un même domaine mais aussi entre ces différents domaines.

Il est toutefois impossible d'ignorer le caractère systémique des évolutions urbaines qui découle des interdépendances entre les différents secteurs ou variables, avec des constantes de temps très longues des dynamiques urbaines. C'est pourquoi l'approche par les courbes de coûts marginaux de réduction est articulée en amont à une approche par les scénarios. Les scénarios considérés décrivent des images cohérentes du futur de l'agglomération de Grenoble qui correspondent à des choix contrastés en ce qui concerne l'évolution des formes urbaines :

- Concentration urbaine (densification)
- Renforcement multipolaire
- Expansion urbaine (étalement)

Les formes urbaines qui en résultent correspondent à des visions contrastées, dans lesquelles il sera plus ou moins facile de mettre en œuvre telle ou telle stratégie de réduction d'émissions. Cependant aucune n'est a priori incompatible avec une stratégie ambitieuse de réduction des émissions de GES.

Principaux enseignements pour la politique énergie-climat de l'agglomération de Grenoble

Les potentiels de réduction identifiés par le projet représentent des quantités significatives par rapport aux objectifs définis par le PCET de l'agglomération d'une réduction de 75% des émissions à l'horizon 2050. Le volume total de réduction comptabilisé est proche de 700 kt CO₂ à comparer à un niveau d'émission estimé, pour les trois secteurs considérés, voisin de 1340 kt en 2010 et entre 1290 et 1370 kt selon les scénarios examinés en 2030.

Les potentiels identifiés sont cohérents avec une trajectoire de réduction d'émissions permettant à l'agglomération de Grenoble d'atteindre le facteur 4 en 2050, mais les marges de manœuvre sont limitées. Les résultats obtenus indiquent que pour se situer sur une trajectoire de réduction d'émission compatible avec le facteur 4 à l'horizon 2050, il faudrait mobiliser la quasi-totalité des options identifiées. La forme très pentue des courbes de CMR permet toutefois de différencier les mesures à mettre en œuvre et suggère notamment de différer ou de laisser de côté certaines. Les mesures dont les coûts d'abattement sont particulièrement élevés (supérieur à 1000 €/tCO₂), la rénovation thermique du parc de bâtiments récents (après 2000) ou les bâtiments utilisant des énergies peu carbonées ou la production d'électricité photovoltaïque, par exemple, ne se justifient pas sur le seul critère des impacts climatiques. Elles ne devraient donc pas être mise en œuvre dans une stricte recherche d'efficacité économique de la politique climatique, mais peuvent bien entendu se justifier au regard d'autres critères (diminution des factures énergétiques, rénovation du parc bâti, augmentation de la part des énergies renouvelables locales, etc.).

Le principal potentiel de réduction d'émissions et le plus intéressant d'un point de vue économique se situe pour l'agglomération de Grenoble dans les bâtiments résidentiels ou à usage tertiaire, et en particulier dans le parc ancien d'avant 1974 et pour les logements chauffés au gaz et au fioul. L'existence de potentiels à coûts favorables dépend toutefois des hypothèses économiques retenues, les coûts augmentant sensiblement lorsque ces hypothèses reflètent les conditions réelles d'investissement pour les ménages. L'écart entre les deux situations montre l'importance de l'effort collectif à engager pour mobiliser les potentiels de réduction d'émissions dans le secteur du bâtiment (information, incitations, subventions, prêts bonifiés, crédits d'impôts, etc.) en complément de l'introduction d'une valeur carbone incitative.

Les options identifiées dans le secteur de la chaleur (production et distribution) représentent le second potentiel de réduction d'émissions (130 kt pour un coût marginal inférieur ou égal à 500 €/t). La substitution des combustibles fossiles par de la biomasse constitue l'essentiel des gains envisagés permettant au mix de production de chaleur d'atteindre 75% de sources renouvelables pour une valeur carbone inférieure à 100 €/tCO₂. La question du coût des mesures dans le secteur des transports est plus complexe à analyser en raison de l'existence d'externalités importantes (le coût du bus à haut niveau de service diminue ainsi de moitié avec la prise en compte des externalités) ou de points de discussion méthodologiques (valorisation du temps). Néanmoins, les coûts obtenus situent les mesures de réduction pour les transports, à l'exception du covoiturage qui apparaît à la fois comme une mesure très efficace et hautement incertaine, dans une fourchette haute (200 – 700 €/tCO₂) comparé aux deux autres secteurs.

Ce résultat est conforme aux enseignements des exercices de modélisation du système énergétique qui concluent généralement que les coûts marginaux de réduction sont plus élevés dans le secteur des transports que dans les autres secteurs (industrie, bâtiment, énergie). On pourrait en conclure qu'il n'est pas coût-efficace d'investir dans le secteur des transports dans le seul but de limiter les émissions de GES. En réalité, les collectivités locales n'investissent pas dans les infrastructures de transport collectif pour réduire les émissions de CO₂ mais pour des objectifs beaucoup plus larges de réduction des pollutions locales et du bruit, ou pour améliorer l'accessibilité de certains quartiers, limiter la place de la voiture en ville, pour l'image de la ville, etc...

Le projet AETIC avait également pour ambition d'apporter des éléments de réponse à la question de l'impact de la forme urbaine sur les émissions de CO₂ et sur les coûts d'abattement auxquels peuvent conduire les différentes configurations urbaines. Les résultats font apparaître sur ce point un impact qui peut sembler limité eu égard aux hypothèses assez contrastées que nous avons retenues dans nos scénarios. Les écarts n'apparaissent vraiment que pour le secteur des transports : le coût moyen de réduction obtenu (pour les 4 principales mesures hors covoiturage) est ainsi de 230 €/tCO₂ pour le scénario de concentration urbaine (coûts avec valorisation des externalités environnementales liées à la pollution atmosphérique et au bruit) contre respectivement 535 et 530 €/tCO₂ pour les scénarios de renforcement multipolaire ou d'expansion urbaine. Le scénario de concentration urbaine qui minimise les distances parcourues, améliore l'usage des transports collectifs, limite la motorisation individuelle semble ainsi plus favorable à la mise en œuvre d'une politique de limitation des émissions de CO₂ qui intègre également les externalités environnementales. Cette idée qu'une ville compacte serait plus favorable en termes de politique climatique est toutefois à relativiser car les résultats sont modifiés lorsqu'on tient compte de la variable temps (temps d'attente dans les transports en commun ou temps gagné par les automobilistes lorsque les congestions diminuent).

[Le projet AETIC : intérêt et limites de la démarche](#)

Le projet AETIC confirme qu'il est possible de développer une méthodologie complète pour l'évaluation économique des principales mesures à déployer dans un plan climat. Si cette méthodologie est encore améliorable, la démarche d'ensemble est validée et les besoins en données et en outils de simulation clairement identifiés. Cette méthodologie est certainement répliquable, avec des adaptations pour tenir compte des données locales, sur d'autres expériences de Plan Climat-Energie Territoriaux.

AETIC intègre dans la construction des CMR la composante urbanisme, et plus particulièrement le lien entre l'évolution de la forme urbaine et la politique climatique, une dimension complémentaire que ne traitent habituellement pas les courbes d'offres de réduction d'émissions. Il s'appuie pour cela sur un modèle transport-usage des sols qui représente les liens complexes entre aménagement, demande de mobilité, infrastructure de transport, choix modaux, etc. Certes les résultats obtenus restent peu différenciés à 2030, mais cela ne signifie pas que les formes urbaines (plus compacte ou plus étalée) ne se différencient pas du point de vue des impacts climatiques et du coût des options à mettre en œuvre (on observe de fait un avantage en faveur de la compacité). Il est probable que ces impacts seraient plus marqués si le périmètre était élargi au-delà de l'agglomération (à la Région Urbaine) et si l'horizon de temps considéré permettait une transformation plus importante de l'espace urbain.

Le projet a mis en avant certaines difficultés méthodologiques inhérentes à la démarche choisie et, en particulier, la dépendance des coûts des options au périmètre considéré pour le calcul (coûts privés plus coûts et bénéfices externes socio-environnementaux) ainsi que la question de l'interaction entre les mesures et entre les secteurs. Le regroupement des options par paquets de mesures a permis de régler en partie ce problème mais pas pour tous les secteurs. Dans le secteur des transports, par exemple, les CMR ne présentent pas une classique forme convexe, mais des parties concaves qui correspondent à des actions à faible coût ne pouvant être activées que lorsque d'autres actions plus coûteuses ont été engagées. De manière générale, la complexité des problèmes liés à l'interdépendance entre les mesures et les secteurs ou à l'intégration d'actions à caractère systémique interroge sur la possibilité d'approfondir la démarche de construction de CMR sans recourir à un modèle global intégré décrivant le système énergétique local. Cette interrogation est l'une des principales pistes de recherche complémentaire identifiée au sein du projet AETIC qui s'est traduite par de nouvelles collaborations pour la modélisation intégrée, bâtiments, transport-usage des sols et systèmes énergétiques locaux.

Le projet AETIC identifie des potentiels de réduction d'émissions qui permettraient, en 2030, de réduire de 50% les émissions de l'agglomération de Grenoble par rapport à 2010, mais cet objectif nécessite de mobiliser la quasi-totalité des options identifiées. On peut alors s'interroger sur les marges de manœuvre qui subsistent en termes de choix politiques. Ce constat de l'ampleur de l'effort collectif à fournir tient en partie à l'horizon temporel considéré ici. Les échelles de temps longues qui caractérisent les transformations urbaines ouvrent en effet sur la contradiction centrale entre la nécessité d'effectuer en trois ou quatre décennies une transition majeure des systèmes sociotechniques urbains et la prise en compte des inerties d'infrastructures et de comportements. Des politiques de refondation urbaine ambitieuses, intégrant par exemple des évolutions vers des profils urbains plus denses ou le développement d'infrastructures de transport collectif, pourraient ainsi ne pas produire d'effets manifestes à court ou moyen terme, mais constituer une logique d'investissement à long terme visant à créer les nouvelles marges de manœuvre pour la réduction des émissions entre 2030 et 2050.

I. Introduction :

La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre a d'abord émergé au niveau international avant de se voir décliner au niveau national. Elle s'exprime aujourd'hui de manière croissante au niveau local et en premier lieu à l'échelle des villes qui concentrent la plus grande partie des consommations d'énergie et des émissions mondiales de gaz à effet de serre, imposant à celles-ci de participer à la mise en œuvre des politiques climatiques. L'implication des villes est également rendue plus nécessaire par le niveau de contrainte qu'impose l'objectif de 2°C d'augmentation des températures. Pour atteindre cet objectif très ambitieux, les leviers globaux risquent toutefois d'être insuffisants poussant ainsi à s'intéresser aux leviers locaux. Cette déclinaison locale des contraintes d'émission doit permettre de mobiliser des potentiels qui seraient inatteignables par des politiques nationales.

L'action locale présente plusieurs avantages. Elle permet en particulier de réduire les coûts de transaction, en tous cas de mettre en place des outils capables de les surmonter. Dans le bâtiment par exemple, la capacité à connaître le parc de logement du territoire, à mobiliser les professionnels locaux, à fournir des informations au plus grand nombre et à intégrer des actions d'efficacité énergétique dans des actions urbaines plus larges est une condition essentielle au succès d'une politique d'efficacité énergétique. Mais la mise en place d'une action au niveau local permet aussi d'agir sur la densité et l'organisation spatiale du territoire. Ces déterminants des émissions des transports et du bâtiment sont eux-mêmes commandés par les règles d'urbanisme et les décisions d'aménagement, qui sont aux mains des collectivités locales. Enfin l'échelon local est le plus à même de stimuler l'implication des acteurs de la société civile, rouages essentiels d'un changement en profondeur vers un futur moins carboné.

En France, l'implication des collectivités locales dans la politique climatique s'exprime notamment par l'obligation de mettre en place un Plan Climat Energie Territorial, qui constitue le cadre dans lequel sont définis les objectifs énergétiques et de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) à l'échelle d'un territoire. Dans la plupart des cas, la question des moyens à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs, que ce soit en termes de méthode ou d'actions concrètes, reste à résoudre et constitue un sujet majeur pour la recherche. C'est à cette problématique que se propose de répondre le projet AETIC en développant une méthodologie originale pour définir et hiérarchiser les actions nécessaires à l'atteinte de ces objectifs locaux de réduction, à partir de critères technico-économiques.

Nous partons en effet du principe qu'aux objectifs ambitieux doivent correspondre des démarches rigoureuses pour choisir et prioriser les actions à mener, et assurer l'efficacité économique indispensable pour la mise en œuvre de politiques climatiques soutenables dans la durée. Comme toute politique publique, l'action pour le climat doit s'astreindre à un certain niveau d'efficacité qui impose le plus souvent de développer de nouveaux outils. Nous considérons aussi qu'une évaluation économique systématique des potentiels de réduction d'un territoire permettra de mieux prendre la mesure de l'importance de l'action locale et des conditions de son expression, facilitant ainsi la mise en place des plans climats locaux.

La démarche visant à définir des stratégies coût-efficaces, déjà appliquée avec succès aux négociations internationales (marché de permis d'émissions au niveau européen) et aux politiques

nationales, s'appuie ici sur la construction de jeux de courbes sectorielles de Coûts Marginaux de Réduction (CMR)/ Il s'agit ensuite d'agréger les courbes sectorielles sous la forme d'une courbe globale qui ordonne toutes les mesures par ordre de coût croissant et permet d'identifier les actions spécifiques à mettre en œuvre pour atteindre un niveau donné de réduction d'émissions.

Le terrain d'application est celui de la Communauté d'Agglomération de Grenoble. Ce choix résulte de l'engagement ancien de l'agglomération dans une démarche de développement durable et en particulier dans l'élaboration d'un PCET qui traduisent une forte motivation sur ces questions, essentielles à la réalisation du projet.

Les mesures sont identifiées dans trois secteurs clé pour la politique climat-énergie à l'échelle locale : les transports, les bâtiments et la production / distribution d'énergie. Mais les stratégies à mettre en œuvre pour réduire les émissions de GES ne peuvent se résumer à un ensemble d'actions incrémentales (amélioration de l'efficacité énergétiques des bâtiments, électrification des transports collectifs, substitution du charbon par la biomasse pour la production de chaleur, etc...), aussi efficaces soient elles. Il est essentiel d'intégrer également la dimension systémique propre au fonctionnement des villes. Aux actions incrémentales, il importe donc d'associer des actions ayant un effet structurant sur l'ensemble du système, en particulier, des actions qui en modifiant la forme urbaine auront des impacts en retour sur la mobilité ou l'offre de transport.

Il s'agit donc clairement d'un projet de recherche exploratoire qui vise à traiter des questions méthodologiques, estimer les besoins et la disponibilité des données, tester la faisabilité de la démarche et son intérêt pour l'élaboration des PCET. Au-delà de l'agglomération de Grenoble, le projet vise à explorer la faisabilité et la pertinence d'une démarche qui pourrait être appliquée à d'autres collectivités françaises.

II. Contexte du projet

1. Les politiques énergie-climat à l'échelle territoriale

La volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre qui a d'abord émergé au niveau international avant d'être déclinée au niveau national, s'exprime aujourd'hui de manière croissante au niveau local. Alors que la forte croissance de la population partout dans le monde s'accompagne d'urbanisation massive et augmente la part des villes dans les émissions globales, ces dernières sont amenées à prendre une part de plus en plus active dans l'action climatique. D'autre part, la contrainte qu'impose l'objectif de limiter à 2°C l'augmentation des températures est si forte qu'il sera certainement nécessaire d'agir sur l'ensemble des leviers disponibles. Or, les leviers locaux sont dans certains cas nécessaires pour améliorer l'efficacité des politiques nationales, et bien plus encore ils sont dans de nombreux cas les seuls moyens de mobiliser des potentiels que les politiques nationales ne pourraient pas atteindre.

Les villes apparaissent ainsi de plus en plus comme des acteurs incontournables pour la réussite de politiques climatiques ambitieuses au plan national, en raison des nombreux moyens d'action qu'elle détiennent au travers des politiques d'urbanisme et d'aménagement, de transport ou de valorisation des sources d'énergie locales.

Il existe plusieurs avantages à agir au niveau local. Cela permet en particulier de s'attaquer "près du terrain" aux coûts de transaction susceptibles de freiner la mise en œuvre des politiques d'atténuation, et de mettre en place des outils capables de les surmonter. Dans le bâtiment par exemple la capacité à connaître le parc de logement du territoire, à mobiliser les professionnels locaux, à fournir des informations au plus grand nombre et à intégrer des actions d'efficacité énergétique dans des actions urbaines plus larges, est une condition essentielle au succès d'une politique d'efficacité énergétique. La mise en place d'une action au niveau local permet aussi d'agir sur la densité et l'organisation spatiale du territoire, ces déterminants des émissions des transports et du bâtiment qui sont eux-mêmes commandés par les règles d'urbanisme et les décisions d'aménagement aux mains des villes. Enfin l'échelon local est le plus à même de stimuler l'implication des acteurs de la société civile, rouages essentiels d'un changement en profondeur des techniques et des comportements vers un futur moins carboné.

Les Plans Climat Energie Territoriaux constituent le cadre dans lequel sont définis les objectifs pour l'énergie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle d'un territoire. Le PCET est un projet territorial de développement durable axé sur la maîtrise de l'énergie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Depuis les chocs pétroliers des années soixante-dix, de nombreuses collectivités locales ont déjà mis en œuvre des politiques actives d'efficacité énergétique, de développement d'infrastructures de transport, d'aménagement des territoires visant à améliorer la qualité de vie. Mais le PCET présente le triple intérêt d'amplifier les politiques existantes par la fixation d'objectifs quantifiés et ambitieux, de leur donner une cohérence d'ensemble, et de rassembler et de mobiliser l'ensemble des acteurs d'un territoire autour d'un projet commun.

Une des principales difficultés que rencontrent les collectivités qui préparent des PCET est de fixer des objectifs de réduction des émissions chiffrés et à long terme. Généralement, elles reprennent les objectifs nationaux, européens ou internationaux. En l'absence d'indicateurs et de données suffisantes pour le territoire, des objectifs très généraux sont souvent adoptés dans une première

phase, sans tenir compte de la capacité à les réaliser. Ensuite, lorsque les objectifs sont précisés et quantifiés se pose la question de l'ampleur des potentiels de réduction d'émissions disponibles ou mobilisables et du coût auquel ils pourront être mobilisés. Plus les objectifs environnementaux sont ambitieux et plus il sera nécessaire de s'assurer de l'efficacité économique des choix effectués de façon à ce que la politique énergie / climat soit soutenable dans la durée.

2. La nécessité d'une approche coût-efficace

La dimension économique constitue un élément clé de l'analyse des politiques énergie-climat. Cette dimension n'est pas ignorée dans la construction des politiques publiques locales mais celles-ci sont plutôt structurées selon des logiques d'arbitrage politique au sein de cadres d'analyses multicritères. Dès lors que les collectivités locales participent plus activement à la réalisation d'objectifs globaux devenus contraignants, et ce dans un contexte budgétaire tendu, il faudra probablement mettre plus l'accent sur la recherche d'efficacité économique.

Depuis plus d'une dizaine d'années, l'approche qui consiste à classer les actions par ordre de mérite (coût unitaire croissant) est appliquée à l'élaboration des politiques climatiques à l'échelle internationale (négociation Kyoto et post-Kyoto, système européen des quotas CO2 négociables pour l'industrie) ou nationale. Les courbes de coût marginal de réduction (CMR) constituent des outils particulièrement robustes et efficaces pour réduire le coût d'un programme complexe de réduction des émissions. En reliant les quantités de réduction et les coûts, elles permettent de tracer les grandes lignes du programme d'action efficace, de calculer le coût de la dernière action à entreprendre (le coût marginal) et d'estimer le coût global du programme.

A l'instar de ce qui s'est produit pour les négociations internationales, des CMR à l'échelle locale peuvent constituer un moyen simple et puissant pour accompagner l'élaboration des PCET en fournissant le support technico-économique nécessaire pour développer une méthodologie de priorisation coût-efficace des actions à entreprendre. Un exemple de l'application de cette méthode à la conception d'une politique climatique urbaine est l'étude réalisée par McKinsey pour Siemens sur la ville de Londres¹ (Figure 1). L'étude distingue trois grands domaines ou secteurs – bâtiments, transports, énergie-eau-déchets – puis analyse dans chaque secteur les principales options de réduction au sein d'une CMR sectorielle et leurs conditions de mise en œuvre. Elle aboutit à l'interclassage des différentes options au sein d'une CMR consolidée qui permet de tracer les grandes lignes du programme de réduction efficace.

Cette approche particulièrement séduisante présente en l'état certaines limitations. En particulier, les mesures qui sont identifiées dans cet exercice (McKinsey) sont de nature essentiellement technologique et excluent les actions d'ordre plus systémique agissant sur le fonctionnement urbain. Aucune action d'aménagement urbain en lien avec la politique de stationnement ou le développement des transports collectifs n'est ici prise en compte. Or il nous semble que la dimension systémique propre au fonctionnement des villes ne peut être ignorée, en particulier l'interaction entre transport et urbanisme qui implique que des choix d'aménagement ont des conséquences sur la demande de mobilité et sur l'offre de transport qui peut être mise en place.

¹ Siemens, 2008, Sustainable Urban Infrastructure London Edition – a view to 2025.

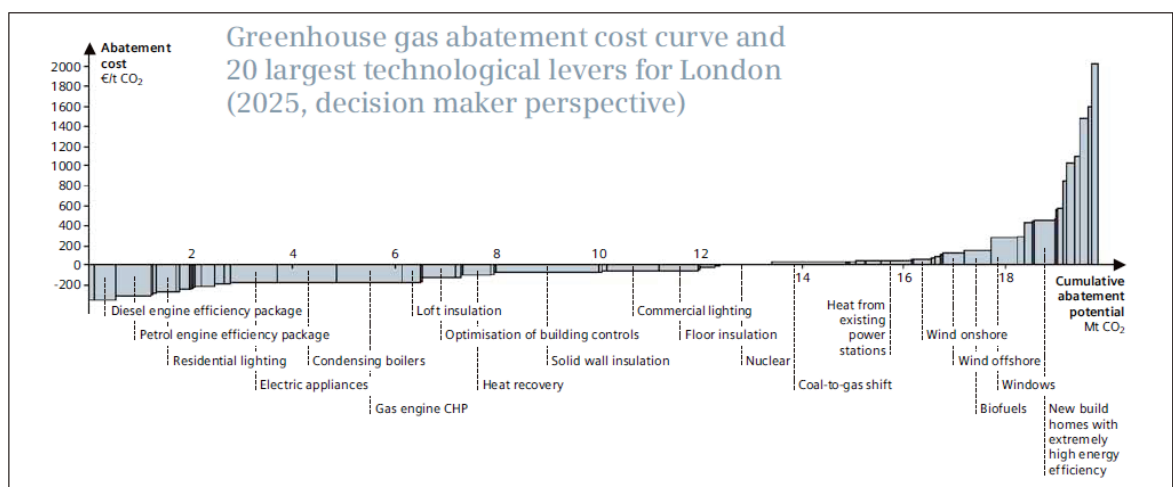
Le projet AETIC tente de construire des courbes de CMR en conservant cette vision systémique de la ville. L'objectif est de disposer d'un outil permettant d'identifier un ordre de mérite des options à mettre en œuvre entre les secteurs mais en considérant à la fois des actions de nature purement incrémentale (options d'isolation des bâtiments, développement d'un parc de véhicules électriques, etc...) et des programmes plus structurants ou systémiques qui intègrent la dynamique du système urbain. L'approche par les courbes de coûts marginaux de réduction est ainsi articulée à une approche par les scénarios, en particulier, pour ce qui concerne les dynamiques d'usage des sols et l'évolution des systèmes de transport.

Les trois scénarios considérés décrivent des images cohérentes du futur de l'agglomération de Grenoble, et plus largement de la région urbaine couverte par le SCOT, qui correspondent à des choix contrastés pour l'évolution des formes urbaines et la mise en œuvre d'infrastructures spécifiques (transport, réseaux d'énergie, etc.). Ils partent du principe que certaines politiques structurantes sont propres à orienter profondément le fonctionnement du système urbain. Les formes urbaines qui en résultent correspondent à des visions contrastées du futur, dans lesquelles il sera plus ou moins facile de mettre en œuvre telle ou telle stratégie de réduction d'émission. Cependant aucune n'est a priori incompatible avec une stratégie ambitieuse de réduction des émissions de GES.

Aussi simple en apparence et efficace que soit l'outil CMR, il est évident qu'une stratégie de réduction des émissions de GES ne saurait se résumer à un principe de stricte minimisation des coûts selon lequel les actions seraient mises en place successivement dans l'ordre croissant de leurs coûts. Il peut en effet exister de nombreuses raisons de ne pas suivre la hiérarchie des courbes de coût marginal, ne serait ce que parce que ces coûts présentent des incertitudes ou n'intègrent pas certaines externalités positives ou négatives, ou parce que le caractère structurant de certaines actions impose une évaluation multi critère dont l'efficacité climatique ne représente qu'une facette.

Bien entendu, le caractère coût-efficace des politiques énergie-climat n'est pas une condition suffisante de leur réussite. Mais nous sommes persuadés que dans la recherche nécessaire d'une plus grande efficacité économique, l'instrument CMR peut contribuer à l'élaboration de politiques énergie-climat plus durables à l'échelle locale comme il l'a fait à l'échelle nationale et internationale.

Figure 1 : Courbe d'offre de réduction d'émissions pour la ville de Londres



Source : Siemens, 2008

3. Le choix de l'agglomération de Grenoble

Le choix de la Communauté d'Agglomération de Grenoble (la Métro) comme objet d'étude découle du fait que cette agglomération s'est depuis longtemps engagée dans une démarche de développement durable qui s'est traduite notamment par la mise en place d'un Plan Climat Energie Territorial. Dans ce cadre, la METRO a souhaité se rapprocher de la communauté des chercheurs et a constitué un comité scientifique chargé d'éclairer les choix de politique climatique à l'échelle locale. L'idée du projet AETIC a émergé dans le cadre de ce comité avec l'objectif de contribuer à l'élaboration du PCET de l'agglomération dans un contexte favorable notamment pour l'accès aux données locales, et de poser les bases d'une démarche pouvant être appliquée également à d'autres collectivités.

La Métro jouit d'une longue expérience en matière de politique énergétique locale, elle est dotée de deux Sociétés d'Economie Mixte, l'entreprise Gaz et Electricité de Grenoble, en charge de la production locale d'électricité et de la distribution du gaz et de l'électricité, et la Compagnie de Chauffage (CCIAG), qui gère le 2nd réseau de chaleur urbain en France. Ces deux instruments confèrent aux institutions publiques de l'agglomération des leviers d'action quant à la composition du mix énergétique et à sa distribution.

L'agglomération apporte son soutien et a construit progressivement une coopération étroite avec une Agence Locale de l'Energie (ALE), en particulier pour l'élaboration des premiers bilans énergétiques de l'agglomération. L'ALE joue aujourd'hui un rôle important d'information et de sensibilisation à la maîtrise de l'énergie auprès d'un réseau d'acteurs publics et privés. Dans le domaine du logement, l'agglomération a également été pionnière dans le lancement d'une Opération Prioritaire d'Amélioration Thermique du Bâtiment (OPATB) qu'elle souhaite aujourd'hui étendre massivement.

L'agglomération a par ailleurs fortement investi dans son réseau de transports collectifs depuis les années 90 (elle est une des premières agglomérations françaises à réintroduire le tramway comme principal moyen de transport public). Elle s'appuie pour cela sur une autorité organisatrice des transports publics (le SMTC) qui finance, construit et organise le réseau de transports de l'agglomération grenobloise et participe à la définition de la politique des déplacements.

La volonté politique et l'existence de nombreux acteurs impliqués sur les questions d'aménagement, de maîtrise de l'énergie ou de développement des énergies locales ont conduit l'agglomération à construire un PCET initialement calé sur l'objectif national du Protocole de Kyoto (stabilisation des émissions en 2010) puis progressivement consolidé et projeté sur le moyen terme (2020) et sur le long terme avec l'adoption d'un objectif Facteur 4 pour 2050.

Figure 2 : Les objectifs du plan air climat de l'agglomération de Grenoble

	À L'HORIZON 2014		À L'HORIZON 2020	
	OBJECTIF	RÉFÉRENCE	OBJECTIF	RÉFÉRENCE
Emissions gaz à effet de serre	Réduire de 14 % les émissions de 2005, pour les IGCE (Industries grosses consommatrices d'énergie) d'une part, et pour les autres secteurs d'activité d'autre part (résidentiel, transport, tertiaire, agriculture et petite industrie)	Objectif intermédiaire 2014 du «Paquet énergie climat» européen	Réduire de 20 % les émissions de 2005	«Paquet énergie climat» européen
Consommations d'énergie par habitant	Réduire de 14 % les consommations de 2005		Réduire de 20 % les consommations de 2005	
Production ENR par rapport à la consommation énergétique totale	Atteindre un niveau de production d'ENR de 14%	Etude de potentiel de développement local des ENR menée par la Métro	Atteindre un niveau de production d'ENR de 16 %	Etude de potentiel de développement local des ENR menée par la Métro
Emissions NO ₂	Réduire de 47 % les émissions de 2005	PPA	Réduire de 61 % les émissions de 2005	SRCAE Rhône-Alpes
Emissions PM10	Réduire de 24 % les émissions de 2005		Réduire de 35 % les émissions de 2005	

III. Points de méthode pour l'élaboration des CMR sectorielles

Le projet AETIC vise à produire des éléments complémentaires d'analyse économique des politiques énergie-climat en s'appuyant sur le concept de courbes de coût marginal de réduction (CMR). La démarche consiste à construire des CMR sectorielles puis à les assembler de façon à obtenir une CMR intégrée décrivant l'ensemble des options de réduction des émissions de CO2 mobilisables à l'échelle de l'agglomération de Grenoble. Par construction, la CMR intégrée organise les options de réduction d'émission par ordre de coût unitaire croissant et identifie l'ordre dans lequel elles doivent être mise en œuvre pour obtenir un programme de réduction coût-efficace.

La définition de la stratégie coût-efficace passe par l'analyse des différents domaines potentiels de réduction que sont les bâtiments, les transports et les systèmes énergétiques locaux. La hiérarchisation permet de mettre en discussion l'efficacité de différentes actions au sein d'un même domaine mais aussi entre ces différents domaines.

Cette partie présente l'approche méthodologique commune utilisée pour la construction des CMR sectorielles. Elle décrit les grandes lignes de la démarche qui pourra être suivie pour produire d'autres courbes dans un contexte territorial différent ou en s'appuyant sur d'autres options techniques. De la même façon, elle aborde également les limites et difficultés concrètes auxquelles est confronté ce type d'approche, en raison de l'existence d'effets systémiques entre les options et les solutions qui ont été identifiées dans le cadre du projet AETIC.

1. Une analyse centrée sur trois secteurs d'activité

Les émissions de GES sur le territoire de l'Agglomération de Grenoble se montaient en 2010 à 2 000 kt de CO2 pour une consommation d'énergie de 11 TWh. Les émissions se répartissaient comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Répartition des émissions de GES (en 2010)

Industrie PNAQ	Industrie hors PNAQ	Résidentiel et tertiaire	Transports	Agriculture	Total
28%	7%	39%	24%	1%	100%

Source : Observatoire du Plan Climat²

Trois grands secteurs représentent plus de 90% des émissions totales de l'agglomération de Grenoble :

- les industries grosses consommatrices d'énergie,
- le secteur résidentiel et tertiaire
- et les transports.

L'objectif du projet AETIC étant d'identifier les actions que les collectivités doivent mettre en œuvre pour tenter de réduire leurs émissions de GES et s'orienter sur une trajectoire compatible avec le Facteur 4, le choix a été fait de retenir pour le projet AETIC les secteurs présentant des enjeux importants en termes de quantité de réduction d'émissions et sur lesquels les collectivités territoriales disposent de leviers d'action significatifs. C'est la raison pour laquelle les industries hors

² Lettre de l'Observatoire Plan Air Climat, janvier 2013

PNAQ (Plan National d'Allocation des Quotas) qui ne représentent que 7% des émissions totales et l'agriculture n'ont pas été retenues.

Les secteurs du bâtiment (résidentiel et tertiaire) et des transports qui représentent les deux tiers des émissions et constituent des secteurs d'intervention clés des collectivités dans le cadre des plans climat-énergie constituent donc les deux secteurs initialement prioritaires pour le projet AETIC.

Bien qu'elles représentent 28% du total des émissions les grandes entreprises industrielles n'ont pas été intégrées dans le périmètre du projet car les moyens d'action dont disposent les collectivités territoriales pour inciter ces acteurs à réduire leurs émissions sont limitées, alors que les contraintes économiques et sociales sont extrêmement sensibles. Les entreprises grosses consommatrices d'énergie sont par ailleurs déjà soumises au plan national d'allocation des quotas d'émissions (PNAQ) qui constitue théoriquement une incitation à limiter leurs émissions de GES, incitation dont l'impact pourrait être renforcé lorsque les quotas seront attribués aux enchères.

Cependant, il nous est apparu nécessaire d'intégrer également les activités liées à la production et la distribution locale de chaleur dont les émissions figurent de manière pratique dans la catégorie des entreprises soumises au PNAQ. La première raison est qu'il nous semblait important de traiter de façon intégrée demande et offre de chaleur, les actions de rénovation thermique sur les bâtiments ou de substitution de chaudières fioul ou gaz par la chaleur réseau ayant un impact direct sur la demande de chaleur adressée au réseau et donc sur les émissions de ce secteur. La seconde raison est liée au contexte spécifique de l'agglomération de Grenoble qui possède le second réseau de chaleur en France après celui de Paris dans un cadre institutionnel particulièrement favorable puisque la Ville de Grenoble en est l'actionnaire majoritaire.

Pour le projet AETIC, les options de réduction des émissions de GES de l'agglomération de Grenoble ont donc été étudiées pour trois grands secteurs d'activité :

- Les bâtiments résidentiels et tertiaires
- Les transports
- La production et la distribution de chaleur

Pour chacun des secteurs considérés, la démarche a consisté à identifier les options de réduction les plus pertinentes (cf présentation des résultats sectoriels) puis pour chacune de ces options à estimer un couple quantité de réduction (tCO₂) et coût unitaire de réduction (€/tCO₂) dont le cumul permet de construire une courbe d'offre de réduction.

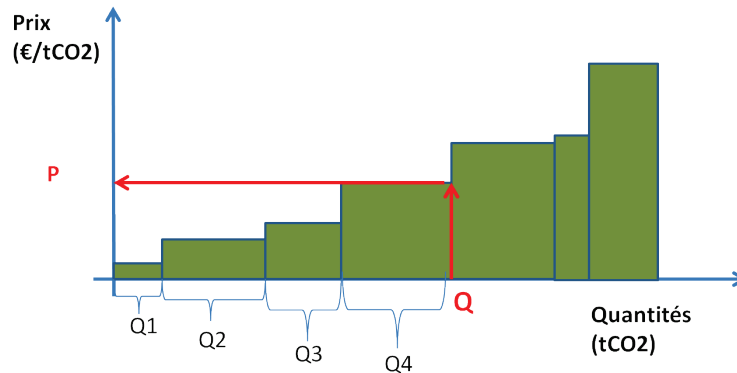
2. La démarche conventionnelle de construction des CMR sectorielles

Une courbe de coût marginal de réduction ou courbe d'offre de réductions d'émissions³ permet d'obtenir pour un territoire donné (pays, groupe de pays ou collectivité territoriale) et pour une année donnée, le coût total de réalisation d'un programme de réduction répondant à un objectif exogène.

³ Dans la suite du texte, nous parlerons de courbes de coût marginal de réduction (CMR) en référence aux travaux réalisés avec le modèle POLES (EDDEN) dans la même logique de construction de stratégies coût-efficaces de réduction des émissions de GES, même si les courbes produites dans le cadre du projet AETIC sont plutôt des courbes d'offre de réduction ou courbes de coûts d'abattement.

Sur la Figure 3, par exemple, on a positionné différentes options de réduction d'émissions, par ordre de coût unitaire croissant. En ordonnées on peut lire les quantités de réduction correspondant à chaque option ainsi que les quantités cumulées et, en abscisse, le coût moyen de réduction de chaque option.

Figure 3 : Courbe d'offre de réductions d'émissions



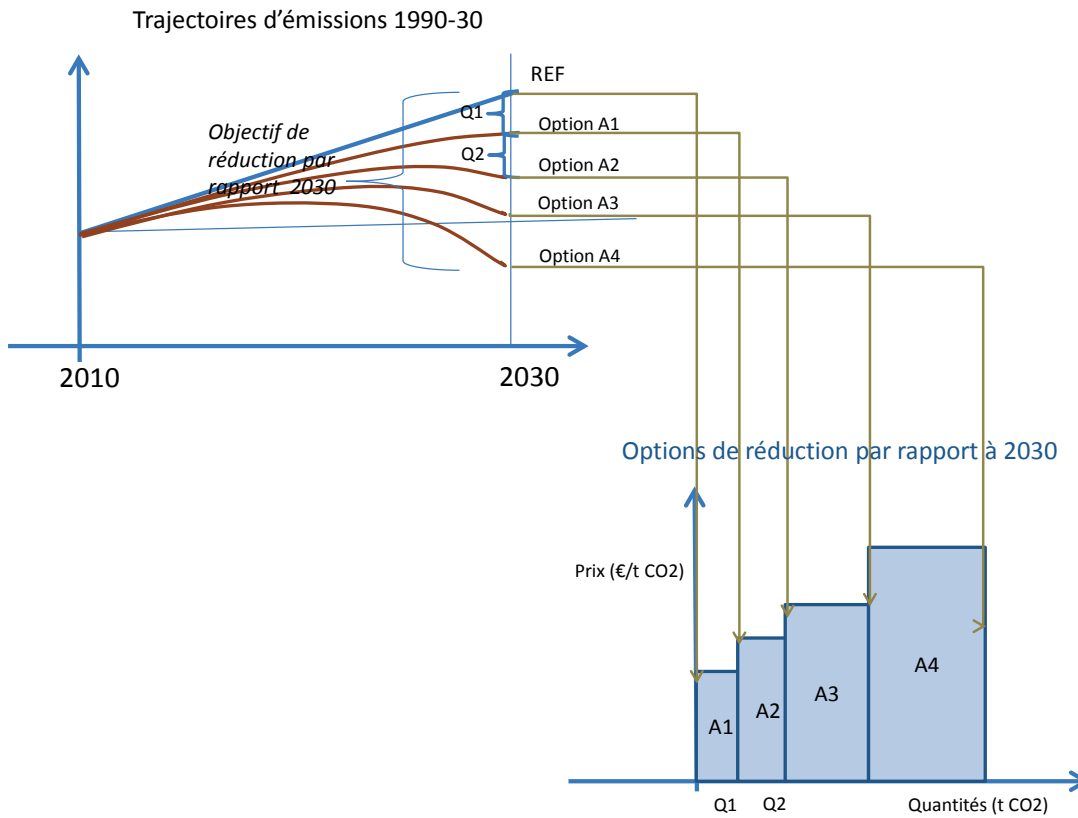
La courbe indique que pour atteindre une quantité de réduction Q , il faut mettre en œuvre les options 1, 2, 3 et 4 et que le coût de la dernière option à mobiliser est P . Le programme qui s'appuie sur les options 1,2,3 et 4 pour obtenir une réduction d'émissions Q est alors coût-efficace. Intégrer une option plus coûteuse dans le programme de réduction, par exemple, ne serait pas rationnel d'un strict point de vue économique si l'objectif quantitatif reste Q . La courbe indique enfin le coût total de réalisation de l'objectif Q qui correspond à la somme des surfaces unitaires des rectangles $(Q_1, P_1) + (Q_2, P_2) + \dots + (Q_4, P_4)$.

On observera que dans cette représentation les options sont positionnées par ordre de coût croissant et qu'elles sont additives c'est-à-dire que la quantité de réduction ainsi que le coût unitaire de l'option n correspondent à une situation dans laquelle les options $(n-i)$ ont déjà été mises en œuvre. Ainsi, la quantité de réduction associée à l'option 3 de même que le coût de cette option suppose que les options 1 et 2 ont été mises en œuvre auparavant.

Estimer des quantités de réduction suppose toujours de définir une situation de référence. Dans le cadre du projet AETIC, les courbes d'offre de réduction sont construites pour l'année 2030. Le cadre de référence correspond à une situation dans laquelle aucune politique climatique additionnelle n'est mise œuvre.

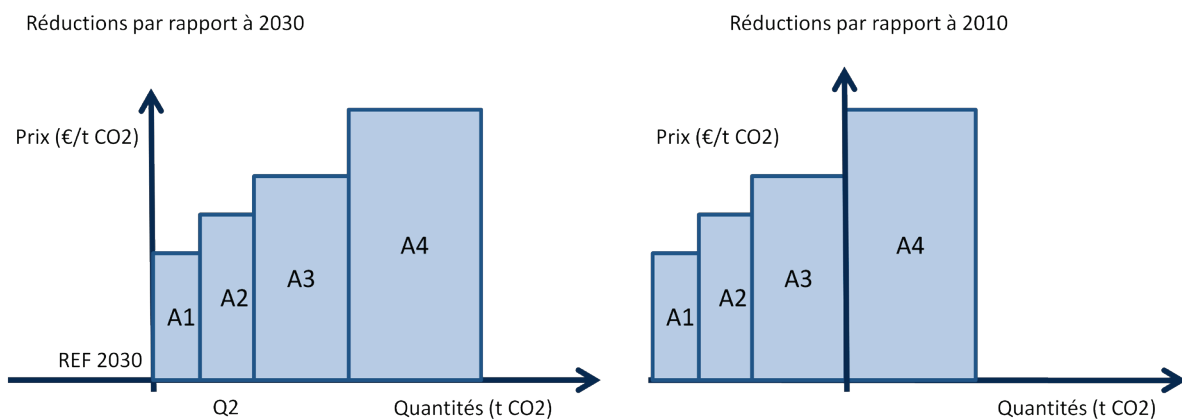
La procédure est décrite sur la figure ci-après (Figure 4). La trajectoire d'émissions est estimée en l'absence de politique climatique supplémentaire pour l'année 2030 (ie sans valeur implicite du carbone au-delà des choix de politique déjà mis en œuvre) mais avec des hypothèses d'évolution des prix de l'énergie (cf infra). L'impact des mesures de réduction d'émissions A_i est estimé en référence à cette situation de manière additive.

Figure 4 : Construction des courbes d'offre



La courbe d'offre produite comme indiqué ci-dessus donne les réductions d'émissions par rapport à la situation de référence en 2030. Elle peut bien sûr aussi être décalée sur son axe pour faire apparaître les réductions d'émissions par rapport à la situation de 2010 (Figure 5).

Figure 5 : Réductions d'émissions 2010 / 2030



3. Construction de la situation de référence

La situation de référence 2030 correspond à un scénario d'évolution de la consommation d'énergie et de la production de chaleur de l'agglomération prenant en compte des hypothèses de croissance de la population et des emplois et donc du nombre de logements et de la mobilité. Trois scénarios contrastés d'évolution de la forme urbaine ont été imaginés qui conduisent à des hypothèses différentes d'évolution et surtout de localisation des logements, des emplois et des déplacements (cf infra – les scénarios structurants). Chaque scénario structurant se traduit donc par une situation de référence qui lui est propre pour les variables ayant une dimension locale. Aucune différenciation n'est introduite pour ce qui concerne les variables technologiques et les prix de l'énergie.

Quel changement technique dans le scénario de référence ?

Par construction, le scénario de référence suppose qu'aucune action supplémentaire de politique climatique locale n'est mise en œuvre. Plus précisément, nous considérons que l'agglomération de Grenoble n'engage pas de nouvelles actions de politique climatique qui n'aient déjà été actées en 2010.

De façon à produire une estimation exhaustive des enjeux associés à la réduction des consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment, nous avons considéré qu'il n'y avait pas de programmes d'actions de rénovation massifs en direction du parc existant dans la situation de référence. En revanche, pour ce qui concerne le parc neuf, la réglementation thermique en vigueur s'applique normalement aux nouveaux bâtiments. Les niveaux de performance énergétique considérés pour les bâtiments neufs sont tels que les options de réhabilitation sur ce parc présentent un très faible intérêt économique.

Pour ce qui concerne le secteur des transports, les performances des véhicules neufs évoluent au rythme des réglementations imposées à l'échelle nationale ou européenne ; mais compte tenu du rythme de renouvellement des véhicules, l'impact sur l'ensemble du parc est ici beaucoup plus important que pour les bâtiments. La référence 2030 intègre donc déjà des hypothèses d'amélioration des performances des véhicules et de transformation du parc avec la diffusion progressive des véhicules électriques et hybrides (cf analyse sectorielle). On doit ici souligner que l'intégration de ces évolutions technologiques dans la référence se traduit par une trajectoire d'émissions en baisse et limite les quantités de réductions d'émission sur lesquelles la collectivité locale est en apparence susceptible d'agir.

Enfin, pour le secteur de la chaleur, la référence en 2030 est déterminée par les caractéristiques de demande spécifiques à chaque scénario structurant et par une hypothèse de remplacement à l'identique des technologies de production existantes. En l'absence de mesures nouvelles de politique climatique à l'échelle locale, les technologies de production de chaleur qu'il faut éventuellement construire pour satisfaire la demande sont identiques aux technologies existantes.

Les hypothèses de prix de l'énergie

Outre la question des éventuelles évolutions technologiques à intégrer dans le scénario de référence, se pose la question des conditions économiques qui prévaudront en 2030 et en particulier des prix de l'énergie. Les hypothèses retenues ont été construites en s'appuyant sur différents scénarios de prospective énergétique du laboratoire LEPII-EDDEN ou du World Energy Outlook de l'Agence

Internationale de l'Energie. Les estimations de taux de croissance des prix internationaux (en valeur constante) se situent entre 2.6 et 2.8%/an pour le gaz et le pétrole sur la période 2010-30, pour le scénario de référence. Ils sont plus faibles (proches de 2%/an) pour les scénarios de moindre demande (politiques d'efficacité énergétique ou de développement des énergies renouvelables).

Pour AETIC, nous avons choisi de retenir des taux annuels de croissance du prix de l'énergie au consommateur final de l'ordre de 2%/an pour les sources fossiles (gaz charbon) et l'électricité, mais une valeur de 3%/an pour le fioul le différentiel de prix entre gaz naturel et pétrole étant ainsi conservé. Pour la biomasse, les perspectives d'accroissement de la demande (chaleur, électricité, carburants) laissent présager une augmentation du prix mais nous avons considéré que celle-ci resterait, au moins jusqu'en 2030, inférieure à la croissance des prix des énergies fossiles.

Les prix indiqués (Tableau 2) s'entendent toutes taxes comprises mais ils n'intègrent pas de valeur carbone additionnelle dans ce scénario de référence sans actions de politique climatique nouvelle.

Tableau 2 : Hypothèses de prix de l'énergie pour situation de référence 2030

Secteur	Energie	2010	2030 REF	tcam
Résidentiel	Gaz naturel	0,06	0,08	2%
	Charbon bitumineux			2%
	Electricité	0,12	0,18	2%
	Fioul léger	0,06	0,11	3%
	Bois			2%
Transports	gazole	0,11	0,19	3%
	Super sans plomb	0,14	0,25	3%
	Gazole	0,09	0,16	3%
Industrie	Charbon bitumineux	0,01	0,01	2%
	Gaz naturel	0,03	0,05	2%
	Electricité	0,07	0,11	2%
	Fioul lourd	0,04	0,07	3%
	Bois (bois plaquette)			2%

4. La question de l'additivité des options techniques

En théorie, les courbes d'offre de réduction, telles que les courbes de type Mc Kinsey, organisent les options de réduction par ordre de coût croissant et informent sur la nature des options à retenir et l'ordre dans lequel les mettre en œuvre pour atteindre un objectif de réduction de manière coût - efficace. Cette construction suppose que chaque mesure ait été testée par rapport à une situation de référence pour identifier la quantité d'émissions évitées ainsi que le coût unitaire correspondant (€/tCO₂) puis classée par ordre de mérite (coût unitaire croissant). Elle fonctionne si les options considérées sont parfaitement indépendantes les unes des autres et si l'ordre dans lequel les mesures sont mises en œuvre n'influe pas sur leurs performances.

Des options le plus souvent interdépendantes

En pratique, les options de réduction des émissions sont rarement indépendantes. Pour prendre un exemple évident dans le secteur du bâtiment, le remplacement d'une chaudière existante par une chaudière plus performante n'économisera pas les mêmes quantités d'énergie selon que le bâtiment aura ou non été isolé auparavant. De même, une isolation par l'extérieur produira des économies plus importantes si elle est appliquée à un bâtiment non traité thermiquement que s'il s'agit d'un bâtiment pour lequel les combles ont déjà été isolés.

De manière plus systémique dans le secteur des transports, on comprend que les effets d'une politique visant à limiter l'usage des véhicules individuels (parkings, vitesse réduite, péages, etc.) seront très différents selon l'ampleur des efforts engagés au préalable par la collectivité en faveur d'une offre de transport collectif. Dans un cas, les contraintes à l'utilisation de la voiture entraîneront un report modal vers les transports collectifs avec des gains importants en termes de consommation d'énergie, dans l'autre, elles se traduiront par une augmentation du coût d'usage mais in fine une moindre limitation des consommations.

On voit par là qu'il n'existe pas une quantité et un coût unitaire de réduction dans l'absolu qui permettraient de caractériser une option de réduction et de proposer un ordre de mérite non contestable. Dès lors que les options de réduction sont en interaction, ce qui constitue le cas général, la démarche théorique qui consiste à estimer pour chaque mesure des quantités de réduction et des coûts par rapport à une situation de référence puis à les classer par ordre de coûts croissants ne peut être utilisée qu'avec précautions parce que l'ordre dans lequel les mesures sont réalisées peut modifier leurs performances et imposer un ordre différent.

Face à cette situation, la démarche consistant à estimer le coût unitaire de chaque option par rapport à une situation de référence donnée puis à proposer un ordre de mérite sur cette base imparfaite avant de ré-estimer les quantités de réduction et les coûts unitaires de chaque option en tenant compte cette fois des mesures précédentes n'est pas une solution. La seconde étape du calcul peut en effet avoir pour conséquence de modifier le premier ordre de mérite de telle sorte que des options à moindre coût se situent après des options plus coûteuses conduisant à des profils de courbes d'offre de réduction non convexes.

Sauf à ne retenir que des options totalement indépendantes les unes des autres, il est donc illusoire de chercher à construire des CMR organisant des mesures de réduction d'émissions dans un strict ordre de coûts croissants.

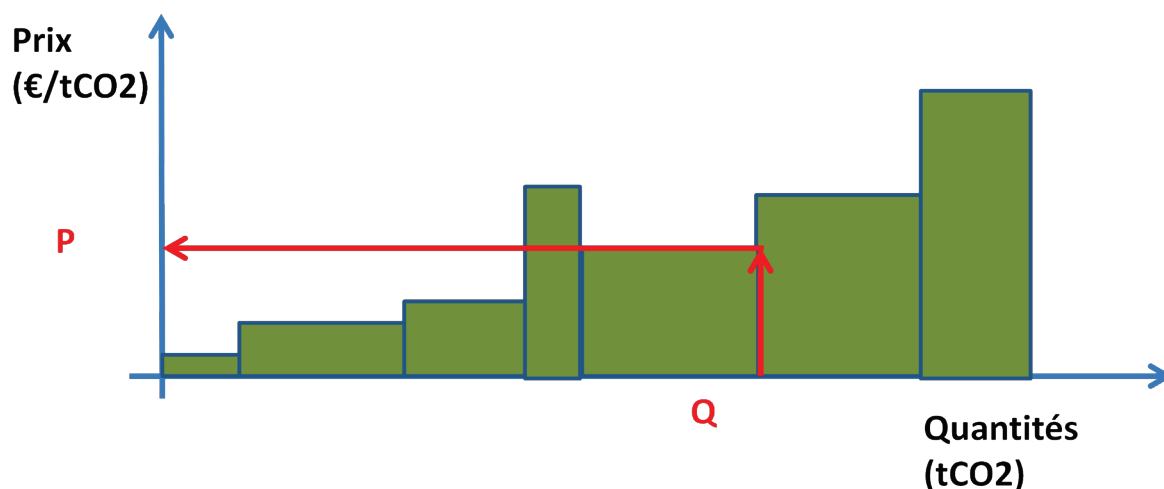
Une approche pragmatique de la construction des CMR

La prise en compte des contraintes qu'impose la réalisation de programmes intégrés complexes conduit aux mêmes conclusions. Certaines options ne peuvent pour des raisons de cohérence programmatique être mises en œuvre qu'après (ou en même temps que) d'autres options et ce indépendamment de leurs coûts unitaires respectifs. Pour reprendre l'exemple précédent, on peut imaginer qu'une collectivité instaurant un dispositif de péage urbain souhaiterait auparavant développer une offre alternative de transport collectif.

Il en résulte des courbes de CMR ayant le profil décrit sur la Figure 6 qui s'interprète de la façon suivante :

- l'objectif de réduction global visé est Q (en rouge),
- l'option 4 présente des coûts unitaires plus élevés que les options 3 et 5,
- pour des raisons techniques, l'option 4 doit être mise en œuvre pour donner accès au potentiel de réduction à faible coût correspondant à l'option 5,
- Le programme de réduction Q est coût – efficace

Figure 6 : Des courbes d'offre de réduction non convexes



Nous avons considéré dans le cadre du projet AETIC que ces profils, quoi que peu standards, étaient parfaitement légitimes et pouvaient décrire une réalité prenant en compte des contraintes effectives dans la mise en œuvre des programmes de réduction des émissions de GES, contraintes que des courbes plus classiques ne traduisent pas. Par ailleurs, il est clair que le domaine du transport est particulier car il existe de nombreux co-bénéfices aux politiques menées dans ce domaine. Pour le dire simplement, bien d'autres éléments justifient l'investissement public dans des solutions de transport en commun par exemple. L'information en termes de coût-efficacité n'est donc qu'une composante de l'évaluation. L'existence de nombreux co-bénéfices implique aussi que selon la façon de comptabiliser les coûts (avec ou sans externalités environnementales, avec ou sans la prise en compte de la valeur du temps...) les niveaux relatifs des coûts évoluent : la hiérarchie peut donc dépendre de la convention choisie par la collectivité pour évaluer les coûts et les avantages de l'opération. Ces éléments sont détaillés dans le rapport sectoriel sur le transport.

Dans le même temps, nous avons cherché à limiter les configurations de ce type en regroupant sous forme de "paquets d'options" celles qui présentent de fortes interactions et pour lesquelles il est difficile de construire un ordre de mérite. Ainsi, les options présentant de fortes interactions ou cohérences programmatiques sont mises en œuvre simultanément, de façon à ce qu'il ne subsiste que des paquets d'option plus nettement indépendants les uns des autres. La conséquence est que le nombre de points constitutifs des CMR est sensiblement réduit mais les paquets d'options peuvent alors être considérés comme additifs et faciliter la construction des courbes.

Pour résumer ce point, la démarche méthodologique suivie dans le cadre du projet AETIC pour l'élaboration des CMR repose donc deux principes :

- Le premier consiste à tenter de regrouper au maximum les options unitaires présentant de fortes interactions sous forme de paquets d'options / programme pour qu'il ne subsiste in fine que des paquets plus nettement indépendants les uns des autres
- Le second est d'accepter que des profils de CMR non conventionnels (non convexes) qui pourraient éventuellement subsister ne sont pas à écarter car ils traduisent une réalité : pour pouvoir bénéficier de certaines options à coût unitaire faible il est parfois nécessaire d'avoir auparavant réalisé des options à des coûts plus élevés.

L'objectif du projet est bien d'intégrer le critère économique dans la décision publique, mais pas d'en faire le critère de décision unique. De nombreux éléments non, ou mal, pris en compte dans le calcul économique ou sortant simplement du champ des politiques climatiques, sont également pris en compte dans les choix publics en matière de développement urbain.

5. Le calcul du coût des options

Pour chaque option technique identifiée, il faut à la fois estimer les quantités de réduction d'émissions qu'elle peut produire et le coût unitaire auquel ces réductions d'émissions sont accessibles. Le coût de la tonne de CO₂ évitée est un coût unitaire actualisé construit par analogie avec le calcul du coût actualisé de production, par exemple d'un kWh électrique :

Coût de la tonne CO₂ évitée =

Coût global actualisé de l'option considérée / Quantité actualisée de CO₂ évité

Le calcul du coût global des options de réduction d'émissions s'effectue en coût complet c'est-à-dire que l'on intègre les coûts d'investissement et d'exploitation. Dans le cas du bâtiment, par exemple, on tiendra bien-entendu compte des économies d'énergie générées par un investissement d'isolation. Lorsque cela est possible, on retient plutôt un coût différentiel (surcoût initial et économies d'énergie) par rapport à l'option de référence permettant de satisfaire le même besoin. Pour l'isolation des bâtiments par l'extérieur, on a ainsi considéré qu'une partie importante des investissements pouvait être réalisée à l'occasion d'une opération de ravalement réduisant ainsi le coût de l'opération de façon significative.

Dans les secteurs du bâtiment ou des réseaux de chaleur, le calcul du coût des options peut présenter des difficultés liées à la connaissance des coûts et à leur éventuelle diversité (hétérogénéité du parc de bâtiments par exemple), à l'efficacité réelle de certaines options, aux conditions dans lesquelles l'investissement est réalisé (valeurs résiduelles, coûts additionnels), etc. Mais le périmètre du calcul économique est relativement bien défini (investissement de production / consommation d'énergie, réduction des coûts d'exploitation énergie / CO₂).

Dans le cas des infrastructures de transports les éléments à prendre en compte sont beaucoup plus nombreux et le calcul plus complexe. S'agissant d'une infrastructure de transport public, le calcul devra intégrer a minima les coûts de réalisation de l'option considérée (coûts d'investissement et coûts d'exploitation) et les conséquences qui en résultent sur l'utilisation des véhicules particuliers : moindre consommation d'énergie et éventuellement aussi réduction du parc de véhicules. Mais le

calcul économique ne peut se limiter au seul aspect des coûts d'usage et doit intégrer d'autres dimensions compte tenu de l'importance qu'elles revêtent dans la décision publique. En particulier, il faudra intégrer les externalités que constituent la pollution locale et le bruit, mais aussi la question du temps (temps de déplacement et temps d'attente) qui joue un rôle très important dans l'analyse économique des infrastructures de transport public. Nous reviendrons sur ce point dans la présentation des résultats sectoriels pour les transports.

Par souci de réalisme, le projet AETIC aborde la question du coût des options de réduction de deux façons différentes correspondant à des logiques distinctes d'acteurs. Dans les secteurs de l'approvisionnement ou de la consommation d'énergie (bâtiment et réseaux) une procédure de calcul simplifié peut être utilisée en raison du caractère monodimensionnel des choix. En revanche pour les transports où la dimension énergétique (ou CO₂) ne constitue qu'un des critères à prendre en compte, un calcul plus élaboré intégrant les principales externalités est nécessaire pour mieux approcher la réalité économique de la décision.

Choix du taux d'actualisation

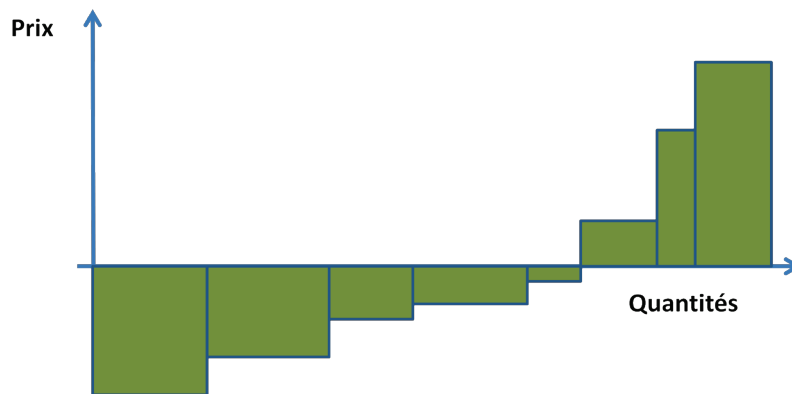
Le taux d'actualisation utilisé dans ces calculs permet de comparer des flux de dépenses ou de recettes échelonnés dans le temps. Il traduit la plus ou moins grande préférence de l'acteur-décideur pour le présent ou le bien être que l'investisseur pourrait avoir dans le futur en contrepartie d'un investissement engagé dans le présent.

Dans les secteurs considérés par le projet AETIC, l'existence de décideurs publics pour les infrastructures de transport ou le parc de logements sociaux et de décideurs privés pour les logements individuels ou en copropriété aurait justifié l'utilisation de taux d'actualisation différenciés pour refléter des préférences pour le présent très inégales. Mais il n'aurait alors pas été cohérent d'intégrer les courbes de coût marginal sectorielles construites sur des bases économiques différentes (plusieurs taux d'actualisation) dans une unique courbe de cout marginal globale. Pour cette raison nous avons décidé de retenir un taux d'actualisation normatif unique de 4%, celui proposé pour les investissements publics dans le rapport Lebègue⁴.

L'utilisation d'un taux d'actualisation de cet ordre, reflétant une faible préférence pour le présent et la prise en compte d'horizons de temps longs, fait apparaître dans bien des cas l'existence d'options techniques à coût négatif (Figure 7). Il s'agit d'actions de réduction des consommations d'énergie qui possèdent leur propre efficacité économique sans qu'il soit nécessaire d'introduire une valeur carbone. Ce résultat est souvent observé dans les travaux qui portent sur les potentiels d'économie d'énergie ou les options de réduction de GES dans le bâtiment.

⁴ Commissariat Général du Plan, 2005, Révision du taux d'actualisation des investissements publics, Rapport du groupe d'experts présidé par D. Lebègue.

Figure 7 : Des potentiels de réduction à coûts négatifs



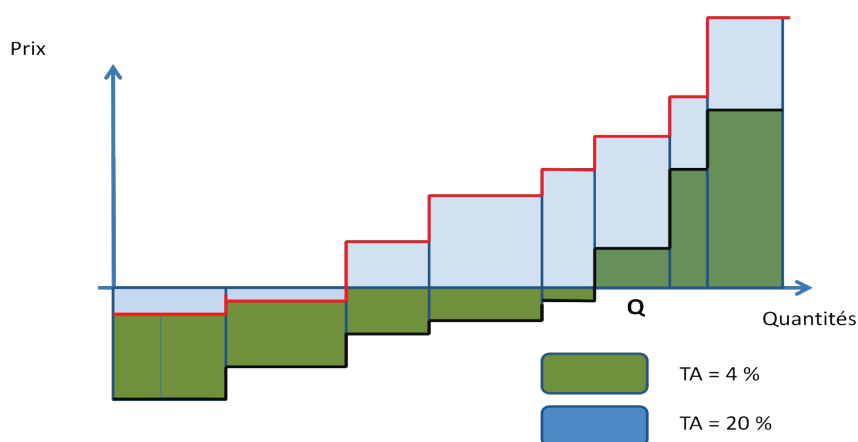
La réalité est on le sait différente. S'il existe des options d'économie d'énergie ou de réduction d'émissions de GES rentables qui ne sont pas réalisées par manque d'informations, c'est parce qu'il existe des imperfections de marché (accès au crédit) ou diverses barrières à l'investissement (coûts cachés, décisions collectives complexes, incertitudes sur les prix futurs, etc...⁵).

Dans la réalité ces options "économiques" ne sont pas mises en œuvre parce qu'elles ne correspondent pas aux critères de rentabilité utilisés sur le terrain par les acteurs qui acceptent difficilement d'investir sur 10, 15 ou 20 ans. Pour ces acteurs, le taux d'actualisation implicite est le plus souvent beaucoup plus élevé que 4% ; l'analyse empirique de la littérature économique (livrable D2.3) démontre que l'importance des coûts de transaction correspondant aux différentes contraintes caractérisant le marché de l'efficacité énergétique justifierait de retenir un taux d'actualisation très supérieur à 4%, que nous avons choisi de fixer à 20% pour le secteur du bâtiment.

La prise en compte d'un taux d'actualisation plus élevé correspondant à la préférence pour le présent constatée des ménages, augmente le coût des options et réduit nettement le nombre d'options à coût négatif ou nul. La courbe en rouge sur la Figure 8 traduit les comportements réels des ménages tenant compte ces contraintes classiques aux investissements d'efficacité énergétique alors que la courbe noire décrit une situation théorique dans laquelle n'existerait aucune imperfection de marché. La surface située entre ces deux courbes fournit une estimation des incitations qu'il faudrait fournir sous des formes différentes (subventions, accès à l'information, réduction des coûts de transaction, etc.) pour que les comportements des ménages se rapprochent du comportement de l'investisseur public agissant avec un horizon de temps très long, soit une très faible préférence pour le présent ($t_a = 4\%$)

⁵ Voir le livrable D2.3 pour une analyse détaillée des principales barrières à l'investissement des ménages dans l'efficacité énergétique

Figure 8: Impact du choix du taux d'actualisation sur les courbes de CMR



En conclusion, on retiendra un taux d'actualisation identique pour les 3 secteurs égal au taux proposé pour les investissements publics dans le rapport Lebègue (2005) pour être en mesure de construire une courbe de CMR intégrée. En parallèle, on établira trois autres CMR sectorielles construites avec des taux d'actualisation spécifiques correspondant à l'horizon temporel et aux conditions de financement de chaque secteur : un taux de 12% pour les grandes infrastructures (acteurs type SEM ou délégataires de services publics) et un autre de 20% pour les ménages ou automobilistes.

6. Illustration de la démarche de calcul : les CMR dans le secteur des bâtiments

Dans le secteur du bâtiment, plusieurs catégories de logements (maison individuelle / logement collectif, avant / après 1974), ainsi que différentes options de réduction ont été identifiées (isolation des combles, isolation des façades, remplacement des fenêtres, changement de chaudières, etc.). Pour les raisons évoquées plus haut (additivité des options) elles ont été regroupées en paquets de mesures cohérentes, au sein de paquets largement indépendants les uns des autres.

Un paquet de mesure se caractérise par une quantité de réduction de consommation d'énergie par rapport à une situation de référence (consommation moyenne des logements de même catégorie sur le parc existant) et un coût de mise en œuvre (coût d'investissement). Le coût unitaire de réduction d'émission de chaque mesure correspond à la valeur carbone qu'il faut introduire pour annuler la valeur actuelle nette (VAN) de l'investissement.

Pour chacune des mesures, le module de calcul MOBAT calcule la VAN de l'investissement pour une valeur carbone donnée. MOBAT teste l'ensemble des mesures identifiées pour des valeurs carbone croissantes. Lorsqu'une VAN est positive, la mesure est activée. On obtient alors un tableau comparable au Tableau 3:

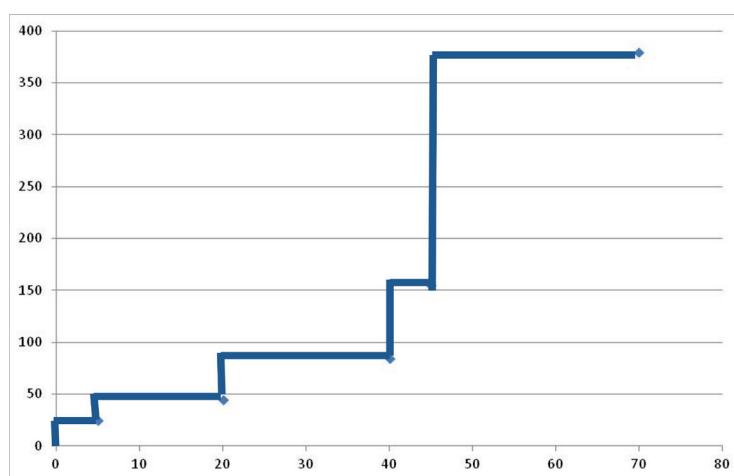
- Pour une valeur carbone nulle, aucune mesure n'est rentable
- Pour une VC de 25 €/tCO₂, l'option 1 est rentable et génère une quantité de réduction d'émissions de 5 tCO₂
- Pour une valeur de 45 €/tCO₂, l'option 2 est rentable, elle vient s'ajouter à l'option 1 pour une quantité totale de réduction de 20 tCO₂
- Etc...

Tableau 3 : Calcul des VAN de chaque option par valeur carbone croissante

	Val carbone	0	25	45	85	155	380
Options techniques	Opt 1		X	X	X	X	X
	Opt 2			X	X	X	X
	Opt 3				X	X	X
	Opt 4					X	X
	Opt 5						X
	Opt 6						
	Opt 7						
			Opt 1	Opt 1+2	Opt 1+2+3	Opt 1+2 ..+4	Opt 1+ 2 +...5
Conso initiale	100	100	95	80	60	55	30
Emissions unit	100	100	95	80	60	55	30
Quantités évitées			5	20	40	45	70
Coût tCO2 évitée			25	45	85	155	380

L'ensemble des éléments (quantités, prix) nécessaires à la construction de la CMR sont alors disponibles (Figure 9).

Figure 9: Construction de la CMR (représentation théorique)



7. Intérêt et limites de l'approche CMR

Cette présentation détaillée de différents points de méthode vise à expliciter la démarche suivie dans AETIC mais également à faire apparaître les difficultés rencontrées dans l'élaboration des courbes de CMR.

L'intérêt théorique de la démarche a déjà été évoqué, il consiste à introduire le critère économique pour atteindre un objectif donné de réduction d'émissions de CO2 à moindre coût. Dans le contexte actuel de très forte contrainte budgétaire, aussi bien à l'échelle nationale qu'à l'échelle locale, la

rationalisation dans le choix des mesures de politique énergie-climat devient de plus en plus nécessaire. La construction de courbes de CMR permet alors de disposer d'un instrument qui pour un objectif donné identifie les options qui doivent être mises en œuvre de façon prioritaire et celles dont l'intérêt est moindre parce que le coût des réductions d'émissions qu'elles procurent est trop élevé.

L'application à une situation concrète comme dans le cas du projet AETIC soulève cependant des difficultés, à deux niveaux essentiellement : l'estimation du coût des mesures et la question de l'ordre de mérite.

La question du coût des mesures dépasse le problème classique de la mesure du coût de réalisation d'une option technique et de son efficacité. Il s'agit tout d'abord d'un problème plus global de calcul économique qui intègre la valorisation ou non des externalités (pour les transports) et l'adoption d'un taux d'actualisation approprié. Pour ce qui concerne les externalités, la nécessité de leur prise en compte pour l'évaluation économique d'investissements publics conduit à des problèmes classiques de périmètre (quelles externalités ?), de valorisation (combien ?) et de forte sensibilité des résultats aux valeurs retenues (cf analyse sectorielle des transports). D'autre part, le souhait de pouvoir intégrer les courbes de CMR sectorielles et de refléter les préférences des acteurs, s'est traduit par le choix de deux taux d'actualisation. Indépendamment du type de scénarios, la conséquence est un dédoublement des courbes de CMR qui tend à rendre plus complexe l'évaluation de la décision alors que l'objectif initial était d'éclairer les choix.

L'autre problème soulevé par la construction des courbes de CMR dans AETIC renvoie à la forme des courbes. Toutes les courbes de CMR classiques sont de forme convexe (ordre de coûts croissant) mais nous avons vu que l'interdépendance entre les mesures et les contraintes programmatiques pouvaient conduire à des courbes non convexes. Il en résulte que des mesures de réduction à coût faible peuvent être positionnées sur la courbe de CMR après d'autres mesures à coût plus élevé, mais pour des raisons d'articulation de la mise en œuvre du programme d'action elles ne peuvent être activées plus tôt. Autrement dit, pour accéder à ces mesures à faible coût il faut avoir au préalable mis en œuvre d'autres mesures plus coûteuses, par exemple l'extension de l'offre de transport public pour rendre faisable et efficace la réalisation d'un péage urbain.

IV. Les scénarios structurants

La démarche décrite ci-dessus et, de façon plus générale, les dispositifs qui s'appuient sur les courbes de coût marginal de réduction permettent d'aider à identifier les stratégies coût-efficace mais considèrent pour cela exclusivement des actions incrémentales. Ces actions incrémentales correspondent à des actions technologiques qui s'additionnent les unes aux autres dans un objectif de réduction d'émissions mais sans interaction les unes avec les autres. Les approches classiques par CMR ne prennent ainsi pas en compte les actions systémiques, par exemple dans le domaine des transports, qui pourraient avoir des effets structurants sur la localisation future des logements et des activités, la demande de mobilité résultante, les choix modaux, les systèmes d'approvisionnement en énergie, etc. Pour cela il faut une approche complémentaire qui intègre la dimension systémique propre au fonctionnement des villes.

Certaines mesures sont en effet propres à changer la structure urbaine et à modifier les coûts et les potentiels d'actions qui seront mis en œuvre par la suite. La définition d'une stratégie de réduction des émissions ne peut donc pas se résumer à un ensemble d'actions incrémentales, mais doit aussi comporter une dimension plus large qui intègre des actions ayant un effet structurant sur l'état du système. Pour cela AETIC s'appuie sur deux approches complémentaires : i) la construction de scénarios de prospective qui représentent des évolutions contrastées de la forme urbaine sur le moyen / long terme (2030) et ii) un outil de modélisation urbaine (TRANUS) tenant compte des principales interactions au sein du système urbain et susceptible de représenter notamment les évolutions de la forme urbaine et ses conséquences sur la dynamique de l'offre et de la demande de transport.

L'objectif est de construire une situation de référence à l'horizon 2030 sans préjuger de ce que sera l'évolution de la forme urbaine à cette date. Le modèle TRANUS est utilisé pour simuler trois évolutions possibles de l'agglomération de Grenoble dans trois directions contrastées mais cohérentes (scénarios structurants). Sur ces trois futurs possibles sont construits des politiques climat – énergie qui s'appuient sur des options distinctes. L'ambition est aussi d'apporter des éléments de réponse à la question du lien entre évolution de la forme urbaine (densification versus étalement urbain) et politiques climatiques.

Au final l'idée défendue est qu'il faut éviter de concevoir des politiques climatiques dans l'abstrait mais bien les intégrer dans une réflexion plus large sur l'avenir de la ville et les politiques urbaines. Le projet AETIC, en intégrant des mesures ayant des impacts sur le fonctionnement urbain et en privilégiant une méthode de scénarios, est l'illustration d'une telle démarche.

1. La modélisation transports – usage des sols (TRANUS)

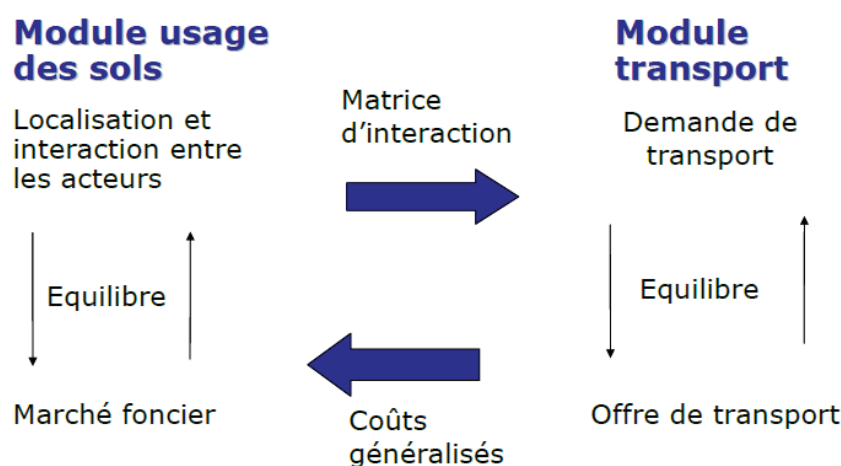
Les modèles Transport et Usage des sols et (LUTI - Land Use Transport Interaction) ont été développés pour combler les limites des modèles transport qui n'étaient pas en mesure de représenter les évolutions conjointes de la mobilité et du système urbain sur une longue période. Au contraire les modèles LUTI sont non seulement capables d'apprécier l'impact des modifications de la structure urbaine sur la demande de mobilité mais également l'effet du système de transport sur l'urbanisation.

Parmi les modèles LUTI existants, TRANUS est un des modèles les plus éprouvés et les plus utilisés dans le monde, le projet AETIC constitue toutefois sa première application réussie en France. Notons qu'il y a actuellement un dynamisme important dans la recherche française autour de ces modèles, auquel participe le projet AETIC⁶. TRANUS est un modèle économique classique du comportement des acteurs dans lequel les ménages / entreprises minimisent leur budget logement- transport ou leurs coûts de production. Il dispose d'un module usage des sols qui détermine la localisation des activités et des individus à partir d'éléments quantitatifs (coûts) et qualitatifs (attractivité) et produit notamment une demande de mobilité. Le module transport établit de son côté la matrice des flux de transport à partir de cette demande et de l'offre de réseau de transports. Les temps et les coûts de déplacement qui en résultent sont ensuite réinjectés dans le module d'usage des sols pour établir des coûts généralisés qui influent sur la localisation des ménages et des entreprises.

Le modèle Tranus est classiquement utilisé pour tester l'impact de différentes politiques de transport et d'usage des sols et notamment :

- Instruments économiques : péage urbain, taxe sur les carburants, tarification incitative du transport public, tarification du stationnement, système incitatif à l'usage de petit véhicule urbain économe en énergie, etc.
- Investissement dans les infrastructures de transport : création de nouvelle infrastructure, amélioration des services de transport public (site propre, augmentation de la capacité des véhicules, du nombre de véhicule, etc.), réorganisation du réseau routier, construction de pistes cyclables, etc.
- Amélioration de l'intermodalité : intégration tarifaire, construction d'infrastructure d'intermodalité (park&ride), etc.
- Usage des sols : au niveau des zones urbanisables : limitation ou extension des zones urbanisables, viabilisation de parcellaire, etc ; au niveau des modes d'urbanisation : politique de densification, de mixité sociale, de mixité fonctionnelle, etc.

Figure 10: Le modèle transport – usage des sols TRANUS



⁶ Voir par exemple le projet ANR Cities, qui regroupe les différentes équipes françaises sur ce sujet, et qui est né entre autres d'une collaboration initiée dans le cadre du projet Aetic avec l'Inria, <https://project.inria.fr/cities/>

TRANUS donne des résultats sur les évolutions de la structure spatiale urbaine (localisation des activités et des ménages dans l'espace urbain, distribution spatiale des prix fonciers) et sur l'évolution du trafic (par catégorie de passager, mode, opérateur, etc.). C'est pour cette raison que le modèle TRANUS a été retenu dans le projet AETIC car il va permettre à la fois de représenter des scénarios d'évolution de la forme urbaine qui constitueront l'ossature de nos trois scénarios structurants puis dans un deuxième temps de tester différentes options de politique de transport et de mesurer leur impact sur la demande de mobilité par mode, sur les consommations d'énergie et sur les émissions de CO2 associées.

2. Trois directions d'évolution de la forme urbaine

Trois grands scénarios ont été construits à l'horizon 2030 en s'appuyant sur un travail de recensement et d'analyse des différents projets urbains de l'agglomération⁷. Ils décrivent des images cohérentes du futur de l'agglomération de Grenoble, et plus largement de la région urbaine couverte par le SCOT, qui correspondent à des choix contrastés en ce qui concerne l'évolution des formes urbaines et la mise en œuvre d'infrastructures spécifiques (transport, réseaux d'énergie, etc.). Ils partent du principe que certaines politiques structurantes sont propres à orienter profondément le fonctionnement du système urbain. Les formes urbaines qui en résultent correspondent à des visions contrastées du futur, dans lesquelles il sera plus ou moins facile de mettre en œuvre telle ou telle stratégie de réduction d'émission. Cependant aucune n'est a priori incompatible avec une stratégie ambitieuse de réduction des émissions de GES.

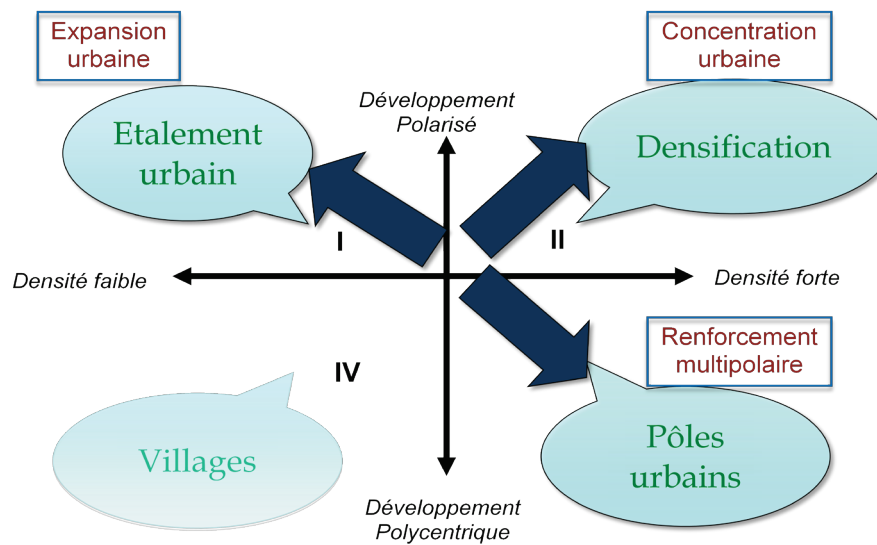
La construction des scénarios s'est appuyée sur une analyse des documents du SCOT et des politiques de l'habitat de l'agglomération (Programme Local de l'Habitat, Cahiers de l'Observatoire de l'habitat), un recensement des projets d'aménagement en cours ou prévu pour l'agglomération de Grenoble ainsi que sur des échanges avec les élus et les services techniques de la METRO. De manière cohérente avec les objectifs de la loi SRU (2000), il ressort qu'un des objectifs centraux des politiques d'aménagement de l'agglomération est de tenter de mettre fin à l'étalement urbain en s'appuyant sur une double stratégie :

- concentrer le développement sur les pôles urbains existants
- recréer la ville sur la ville et réduire l'étalement urbain en périphérie de la région urbaine (renouvellement urbain / densification) en proposant une offre de logement adaptée, en particulier aux familles, dans les zones déjà urbanisées.

Trois configurations ont donc été retenues qui s'inscrivent sur un quadrant structuré par deux variables orthogonales, la densité urbaine et la polarité (Figure 11). Le premier scénario (Expansion Urbaine) prolonge la tendance observée à l'étalement urbain alors que dans les deux autres scénarios (Concentration Urbaine et Renforcement Multipolaire) s'exprime une volonté politique d'inverser cette tendance et de concentrer le développement sur les espaces déjà urbanisés.

⁷ Voir livrable D1.2

Figure 11: Trois grands scénarios structurants



Le scénario « Expansion Urbaine », est un scénario de poursuite de la périurbanisation dans lequel la localisation des activités économiques n'est pas modifiée de façon significative (centrage sur la METRO⁸) et reste en décalage avec l'implantation des nouveaux logements situés prioritairement en périphérie des zones urbaines (au-delà de l'agglomération de Grenoble). La proportion de maisons individuelles domine dans les nouveaux logements. Les politiques de transport préservent une place importante à la voiture individuelle sur le territoire urbain et dans la mobilité. La réduction des émissions passe plutôt par des solutions technologiques (véhicules bas carbone) et réglementaires (péage urbain avantageant les véhicules peu polluants).

Dans le scénario de "Concentration Urbaine", les politiques d'aménagement conduisent à mettre en cohérence la localisation des logements et des activités économiques sur les principaux pôles urbains de l'agglomération. La politique du logement privilégie la construction de logements collectifs, augmentant ainsi la densité dans les zones bâties, et vise à préserver les espaces naturels ou agricoles protégés. Cette augmentation de la densité urbaine permet d'améliorer la rentabilité des transports collectifs qui sont privilégiés par rapport à l'utilisation de la voiture individuelle.

Enfin, dans le scénario de « Renforcement Multipolaire », inspiré par la démarche du Scot grenoblois, on cherche à conforter les espaces urbains de l'ensemble du territoire et pas seulement l'agglomération. Il s'agit de trouver un équilibre entre ces différents pôles en redistribuant l'offre de service et d'emploi tout en tentant de développer de nouvelles stratégies de transport en commun adaptées à ces pôles secondaires. Les nouveaux logements seraient majoritairement du type habitat collectif.

Pour élaborer ces scénarios, des paquets structurants de mesures qui influent sur la localisation des populations et des activités sont entrés dans le modèle TRANUS de façon à faire évoluer la forme urbaine de l'agglomération de Grenoble dans les trois directions spécifiées. A partir d'une

⁸ L'agglomération de Grenoble qui concentre 75% des emplois de la Région Urbaine de Grenoble (RUG) ne loge que 60% de la population.

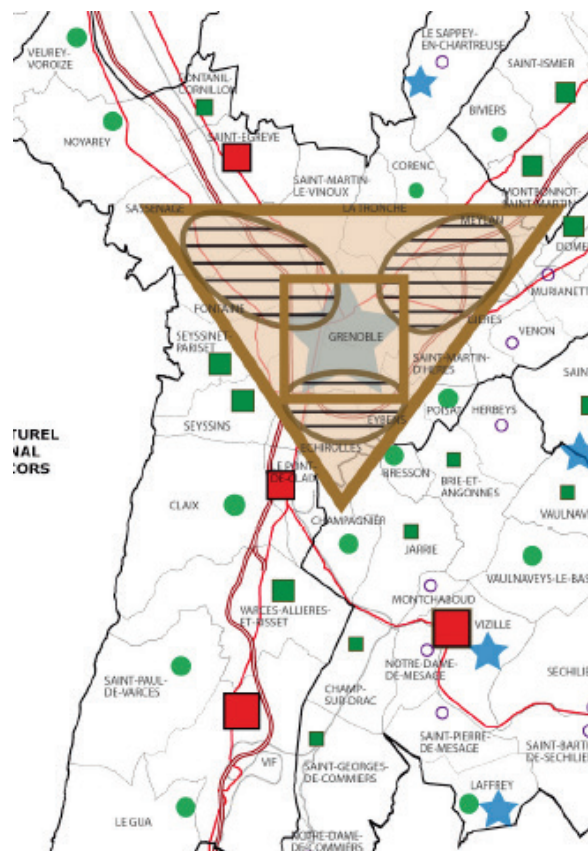
représentation de la situation de l'agglomération en 2010, le modèle génère trois trajectoires et configurations urbaines en 2030 correspondant aux scénarios.

3. Les grandes évolutions: population et emplois

Nous présentons dans cette section l'évolution des deux principales variables qui caractérisent les trois scénarios évoqués ci dessus : population et emplois. Pour cela nous avons rassemblé les données en trois grandes catégories d'espace urbain (voir la carte ci-dessous – source cartes générales du SCOT, 2012 - Figure 12) :

- Grenoble
- Les pôles urbains principaux de la 1^{ère} couronne selon la typologie du SCOT (St Martin d'Herès, Gières, Meylan, Echirolles, Fontaine, plus Sassenage et St Martin le Vinoux)
- Les autres pôles urbains de l'agglomération (St Egreve, Fontanil, Seyssinet - Pariset, Seyssins, Le Pont de Claix, Varcès, Vif) et le reste de l'agglomération (Corenc, Eybens, Claix, Veurey Voroise, Domène, Murianette, St Paul, Le Gua)
- Les deux principaux pôles urbains hors agglomération (Voiron et Saint Marcelin)
- Les autres pôles principaux hors agglomération (Voreppe, Moiran, Rives, Tullins, Crolles, Montbonnot, Villard, Pontcharra).
- Et le reste hors agglomération.

Figure 12: Les schémas de développement de l'agglomération de Grenoble

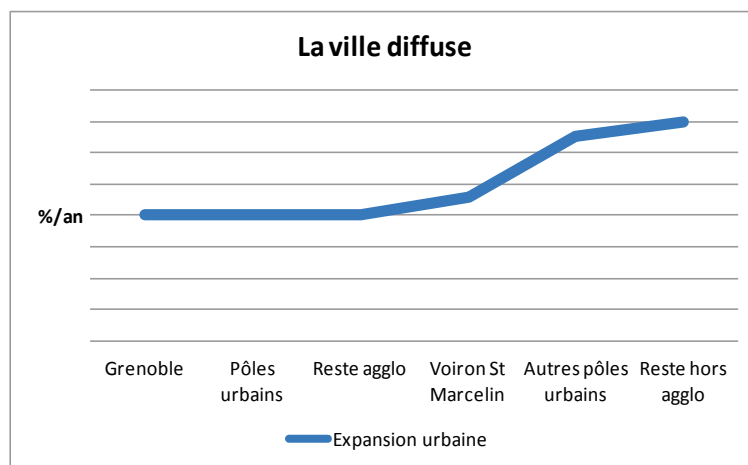


L'agglomération de Grenoble représente une population de près de 400 000 habitants et 210 000 emplois⁹, soit respectivement 54% des habitants de la région urbaine de Grenoble (périmètre du SCOT) et 67% des emplois. Ce déséquilibre entre la localisation de la population et des emplois correspond à une tendance régulière depuis plusieurs décennies avec une croissance beaucoup plus soutenue de la population dans les communes résidentielles des secteurs périurbains alors que les emplois restent associés aux principaux pôles urbains dans l'agglomération de Grenoble.

Les hypothèses de croissance retenues qui prolongent les tendances passées sont de 0.6%/an pour la population et de 0.5%/an pour les emplois. Pour l'ensemble de la Région Urbaine de Grenoble, la croissance en 2030 est de 100 000 habitants supplémentaires soit de l'ordre de 80 000 logements et 30 000 emplois. Mais la répartition des emplois et de la population entre agglomération et hors agglomération, pôles urbains et secteurs péri urbains varie selon les scénarios considérés.

Les résultats sont présentés sur le périmètre de la Région Urbaine de Grenoble qui est le périmètre pertinent sur lequel analyser les dynamiques de population et d'emploi. Les Figure 13, Figure 14 et Figure 15 indiquent les taux de croissance annuels moyens de la population pour les six catégories d'espace urbain définis précédemment. Les trois premières catégories appartiennent à l'agglomération de Grenoble et les trois suivantes sont situées hors agglomération. Pour chacune de ces zones (agglomération / hors agglomération), la partie gauche du graphique correspond à la ville centre (Grenoble pour l'agglomération, Voiron et St Marcelin pour le reste de la région urbaine), puis aux principaux pôles urbains secondaires et enfin aux zones urbaines de moindre importance, ou aux zones péri-urbaines et rurales.

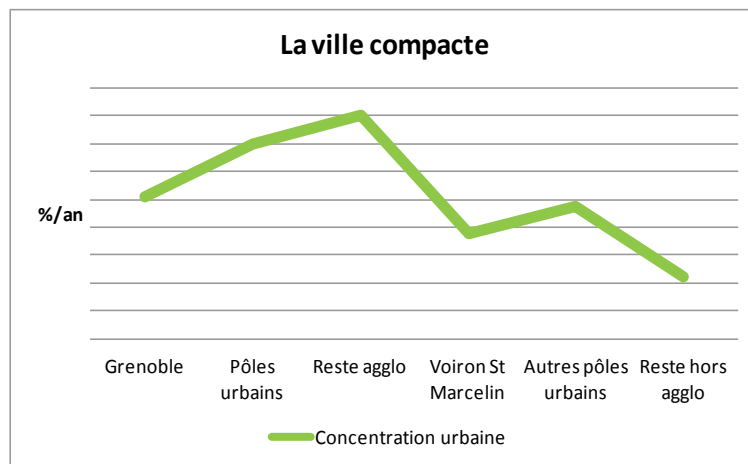
Figure 13: le scénario d'expansion urbaine (taux de croissance de la population par zone)



Sur la Figure 13, correspondant au scénario tendanciel d'expansion urbaine, les taux de croissance des zones situées dans l'agglomération (Grenoble, Pôles urbains, Reste agglomération) sont faibles. La croissance des logements se porte essentiellement à l'extérieur de l'agglomération et en particulier sur les pôles urbains secondaires et la périphérie.

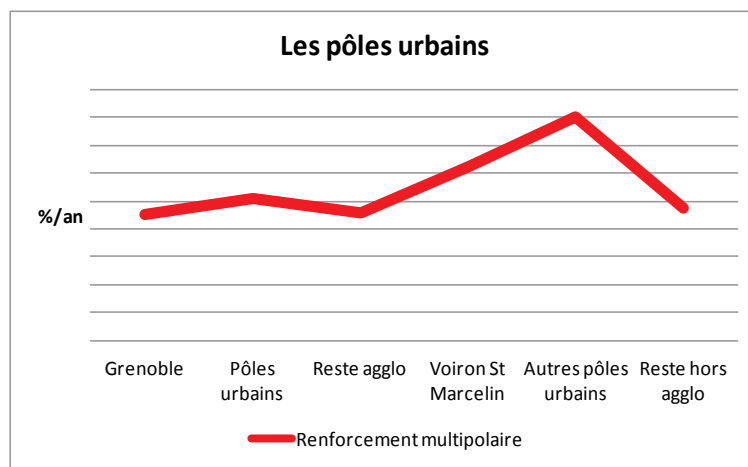
⁹ Projet d'aménagement et de développement durables, SCOT de la Région Urbaine de Grenoble SCOT 2030, déc. 2012.

Figure 14: le scénario de concentration urbaine (taux de croissance de la population par zone)



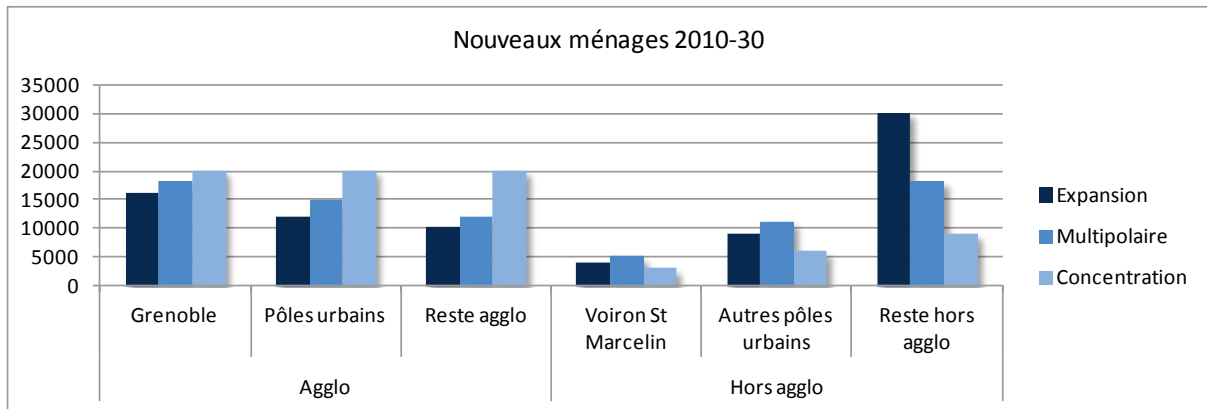
A l'inverse, le scénario de concentration urbaine prend le contrepied du premier et suppose que l'offre de logements peut se concentrer à l'intérieur de l'agglomération. Les taux de croissance sont donc plus faibles dans les trois zones situées en dehors de l'agglomération. Compte tenu des contraintes foncières, on observe toutefois que l'offre de nouveaux logements concerne peu la ville de Grenoble, l'essentiel des constructions se situant dans les pôles urbains et le reste de l'agglomération où existe encore du foncier disponible.

Figure 15: le scénario de renforcement multipolaire (taux de croissance de la population par zone)



Le troisième scénario de renforcement multipolaire est le scénario privilégié par le SCOT. Il vise à une réorientation de la croissance en faveur des pôles urbains mais tout en préservant un équilibre entre l'agglomération de Grenoble et les secteurs extérieurs. Ainsi, si la croissance est un peu plus marquée sur les principaux pôles urbains au sein de l'agglomération, l'essentiel se porte sur les pôles urbains secondaires situés dans les autres secteurs du SCOT hors agglomération. Comme dans le scénario de concentration urbaine, la forte croissance périphérique observée dans le scénario plus tendanciel est ici fortement ralentie.

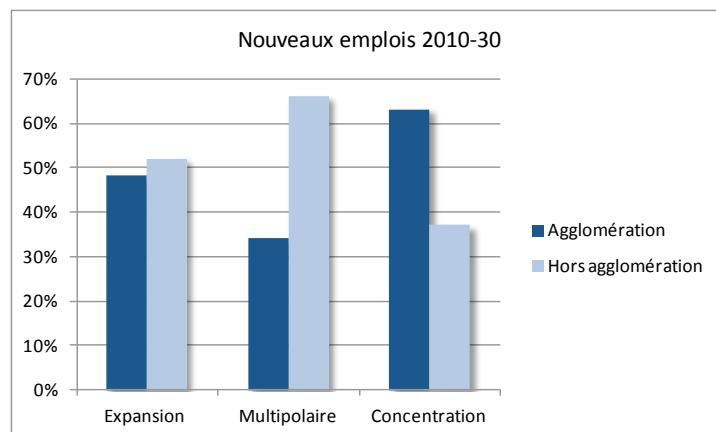
Figure 16: Augmentation du nombre de ménages



Compte tenu du poids relatif des différentes zones urbaines sur la population de l'ensemble de la zone, les résultats en valeurs absolues sont légèrement différents mais on retrouve la hiérarchie recherchée entre les scénarios avec une moindre augmentation plus nette du nombre de ménages dans l'agglomération au profit de la périphérie pour le scénario d'expansion urbaine et au contraire une augmentation plus nette pour le scénario de concentration.

En ce qui concerne les emplois (Figure 17), les contrastes se situent entre les scénarios de concentration et multipolaire qui conforte la position de l'agglomération pour le premier alors que le second tend à trouver un nouvel équilibre au sein de la RUG. En ne modifiant pas la répartition des emplois entre agglomération et hors agglomération, le scénario d'expansion urbaine maintient les déséquilibres antérieurs entre création d'emplois et localisation des logements.

Figure 17: Augmentation du nombre d'emplois



4. Bilan et évolutions des consommations d'énergie et émissions de CO2

L'agglomération de Grenoble produit un bilan annuel des consommations d'énergie et des émissions de CO2 dans le cadre de son plan climat-énergie territorial. Ce travail est effectué en collaboration entre l'Agence locale de l'énergie et du climat (ALEC) et l'Association de surveillance de la qualité de l'air de la région de Grenoble (ASCOPARG). Il permet de contrôler ex post la conformité de l'évolution des consommations et des émissions avec les objectifs du PCET et donc de contribuer à l'élaboration de la politique climatique de l'agglomération. Néanmoins, il ne produit pas de bilans prospectifs pour l'horizon 2030. Dans le cadre d'AETIC, un bilan spécifique a été élaboré de façon à produire une

projection des consommations d'énergie et des émissions de CO2 pour l'année 2030 pour le parc de bâtiment.

La démarche retenue consiste à caractériser de façon détaillée le parc de bâtiments selon le type de logement (individuel / collectif), l'âge, le système et l'énergie de chauffage (source : recensement des ménages). Le parc de logements et le parc tertiaire sont traités de façon séparée et avec des méthodologies un peu différentes car les données disponibles pour le tertiaire ne permettent pas une caractérisation aussi fine¹⁰. Les consommations d'énergie par source et par usage (chauffage, eau chaude sanitaire, électricité spécifique) sont ensuite estimées à partir de données relatives aux consommations unitaires par type (type de logement, d'énergie de chauffage ou type de bâtiment tertiaire). Cette approche permet de reconstituer les consommations d'énergie des bâtiments pour une année donnée et d'estimer les consommations futures en faisant des hypothèses sur l'évolution des principales variables, dont le nombre de ménages (ie les surfaces) et le nombre d'emplois tertiaires.

L'application des hypothèses sur l'évolution des ménages par commune résultant des simulations effectuées par le modèle TRANUS pour les trois scénarios structurants donne les évolutions de la consommations d'énergie pour 2030 pour les logements (Tableau 4).

On observe sur la consommation d'énergie la conséquence des évolutions du nombre de ménages et de leur répartition dans les communes de l'agglomération, avec une croissance beaucoup plus marquée de la consommation pour le scénario de concentration urbaine (13% en moyenne pour l'agglomération) comparé aux deux autres scénarios, et en particulier, le scénario d'expansion (5,7%). On observe également que dans le scénario de densification, l'augmentation de la consommation ne concerne pas en priorité les grands centres urbains comme Grenoble, Echirolles, St Martin d'Hères, déjà fortement denses, mais les centres urbains secondaires qui conservent des marges de croissance. A l'inverse pour le scénario d'étalement urbain (expansion urbaine) ce sont principalement les petites communes de l'agglomération qui profitent de l'augmentation de la population, l'essentiel se situant toutefois en dehors du périmètre de l'agglomération (cf. Figure 16).

¹⁰ Pour le résidentiel, les données source sont des données INSEE et le maillage est à l'IRIS. Voir le livrable D3.1 pour une présentation plus détaillée de la démarche.

Tableau 4 : Consommation d'énergie du résidentiel par communes (2010-2030)

en MWh	2010	2030			croissance 2010-30		
		Concentration urbaine	Renforcement multipolaire	Expansion urbaine	CU	RM	EU
Agglo					%	%	%
Claix	63 143	73 857	68 929	69 536	17%	9%	10%
Corenc	41 170	44 855	42 500	43 057	9%	3%	5%
Domène	46 026	50 367	48 495	47 555	9%	5%	3%
Echirolles	231 256	257 415	246 151	239 940	11%	6%	4%
Eybens	65 809	84 257	74 096	72 388	28%	13%	10%
Fontaine	140 304	161 433	151 921	150 513	15%	8%	7%
Gières	41 305	45 650	44 869	42 446	11%	9%	3%
Grenoble	1 072 161	1 173 480	1 143 301	1 114 248	9%	7%	4%
La Tronche	49 625	54 877	51 565	51 131	11%	4%	3%
Le Fontanil	19 102	23 261	19 120	19 120	22%	0%	0%
Le Gua	17 445	18 888	19 782	19 681	8%	13%	13%
Meylan	141 871	152 885	152 468	146 815	8%	7%	3%
Murianette	6 337	7 597	7 401	6 997	20%	17%	10%
Noyarey	18 095	24 567	20 781	20 555	36%	15%	14%
Poisat	17 064	19 243	18 527	18 048	13%	9%	6%
Pont de Clais	75 689	91 906	79 811	78 834	21%	5%	4%
Sassenage	189 224	236 149	200 193	203 642	25%	6%	8%
Seyssinet	88 494	95 941	94 613	92 311	8%	7%	4%
Seyssins	57 567	72 356	64 328	62 899	26%	12%	9%
St Egrève	117 436	133 962	126 880	122 810	14%	8%	5%
St Martin d'Herès	182 165	208 656	197 022	194 149	15%	8%	7%
St Martin le Vinoux	40 093	48 222	46 326	45 516	20%	16%	14%
St Paul de Varcès	17 073	20 011	19 396	20 083	17%	14%	18%
Varcès	42 751	50 897	47 031	49 365	19%	10%	15%
Vaurey Voroize	12 375	13 068	13 166	13 484	6%	6%	9%
Venon	7 456	7 506	7 506	7 506	1%	1%	1%
Vif	60 112	69 613	67 394	71 420	16%	12%	19%
TOTAL	2 861 149	3 240 917	3 073 573	3 024 050	13,3%	7,4%	5,7%

Plus encore que pour les ménages, les scénarios structurants sont discriminants pour l'évolution des emplois sur la région urbaine de Grenoble. Dans le scénario de concentration urbaine ils concernent en priorité l'agglomération alors que pour les deux autres scénarios, le scénario de renforcement multipolaire en particulier, l'activité économique se concentre à l'extérieur de l'agglomération. Au total, l'accroissement de la consommation d'énergie des bâtiments (résidentiel et tertiaire) est nettement plus sensible pour le scénario de densification, mais même dans ce cas elle ne représente que 14% de la consommation de 2010 (Tableau 5).

Tableau 5: Consommation totale d'énergie du résidentiel et évolutions (2010-2030)

en GWh	2010	2030			Bâtiments neufs (2030)		
		Concentration urbaine	Renforcement multipolaire	Expansion urbaine	CU	RM	EU
Résidentiel	2861	3241	3074	3024	380	212	163
Tertiaire	1859	2132	1923	1946	272	63	86
Total bâtiments	4721	5372	4996	4970	652	276	249

Les émissions de CO2 résultantes pour le secteur du bâtiment sont indiquées au Tableau 6 qui montre des écarts très faibles entre les deux scénarios de renforcement multipolaire ou expansion urbaine.

Tableau 6: Emissions CO2 pour le résidentiel et le tertiaire (2010-2030)

en ktCO2	2010	2030		
		Concentration urbaine	Renforcement multipolaire	Expansion urbaine
Résidentiel	561	630	599	591
Tertiaire	387	454	406	409
Total bâtiments	948	1084	1005	1000

Au total, les émissions comptabilisées pour l'ensemble de l'agglomération représentent un peu plus de 1300 kt de CO2 pour l'année 2010, dont deux tiers pour le secteur du bâtiment (environ 1000 kt de CO2). Pour les transports, seules les émissions liées aux déplacements des personnes internes à l'agglomération sont ici comptabilisés, le trafic de transit étant exclu ainsi que les transports de marchandises qui représentent un poids important dans les émissions du secteur transport. Les émissions liées à la production de chaleur n'apparaissent pas en tant que telles dans le tableau car elles sont déjà comptabilisées dans le secteur du bâtiment. On constate que les écarts entre les scénarios 2030 sont finalement assez peu importants. Malgré des taux de croissance nettement différenciés, les écarts de population entre les scénarios sont, en 2030, inférieurs à 10%. Compte tenu de la faible consommation des bâtiments neufs, les consommations additionnelles sont faibles et les différences entre les scénarios peu apparentes. De même pour le secteur des transports, les modifications à la marge de la localisation des populations et des emplois ont peu d'impacts en termes de mobilité ou de choix modaux et in fine de consommation d'énergie et d'émissions de CO2 (cf infra analyse sectorielle).

Tableau 7: Emissions totales de CO2 (2010-2030)

en ktCO2	2010	2030		
		Concentration urbaine	Renforcement multipolaire	Expansion urbaine
Bâtiments	948	1084	1005	1000
Transports	390	285	289	289
TOTAL	1338	1369	1294	1289

V. Résultats sectoriels

Nous présentons dans la partie qui suit les principaux éléments des démarches suivies pour l'élaboration des courbes de CMR sectorielles ainsi que les résultats obtenus et les conclusions que l'on peut en tirer pour le secteur.

1. Le secteur des transports

Pour le secteur des transports, la démarche d'élaboration des courbes de CMR s'est déroulée de la façon suivante :

- Collecte des données (logement, emplois, réseaux de transports, mobilité, etc.), construction du modèle et calage initial sur une année de base,
- Construction des trois scénarios structurants à l'horizon 2030
- Identification des principales mesures pouvant contribuer à la réduction des émissions dans le secteur des transports, regroupement sous forme de paquets de mesures cohérents et choix d'une séquence de mise en œuvre
- Construction des courbes de CMR

Dans la partie qui suit nous décrivons les points clés de cette démarche et les principaux résultats, les détails figurant dans le livrable du WP1 consacré au secteur des transports¹¹.

Les options de réduction des émissions

Pour réduire les émissions de CO2 liées au transport des biens et des personnes, on peut actionner différents leviers : limiter la demande de mobilité par des politiques d'usage des sols appropriées (densification, rééquilibrage emplois, commerces, logements), modifier le partage modal par des investissements dans l'offre de transport collectif ou en dissuadant l'usage de la voiture (stationnement, péage), améliorer le taux d'utilisation des moyens existants par la création de sites propres ou le covoiturage ou réduire les émissions unitaires des véhicules en favorisant la transformation du parc (réglementation pour les véhicules neufs, diffusion des véhicules électriques ou hybrides). Les mesures considérées dans AETIC appartiennent à ces différentes catégories.

Le Bus à Haut Niveau de Service (BHNS)

Le bus à haut niveau de service est comme le métro et le tramway un système de transport public utilisant majoritairement des emprises affectées à son exploitation. Cela lui permet d'atteindre une vitesse commerciale sensiblement améliorée par rapport à un bus classique et dans les cas les plus favorables une capacité proche de celle d'un tram. La réalisation d'un BHNS présente l'avantage d'être plus rapide à mettre en œuvre qu'un tram et selon le niveau d'investissement souhaité dans le site propre et les matériels roulants, relativement moins coûteuse.

Dans le cas de l'agglomération de Grenoble, qui dispose déjà d'une infrastructure importante de tramways, nous faisons l'hypothèse d'un investissement intermédiaire qui permet d'améliorer nettement l'image du bus et donc sa fréquentation sans toutefois atteindre le niveau de service d'un tram. Le coût estimé pour l'infrastructure se situe à 5 M€/km soit une valeur intermédiaire entre les

¹¹ Cf le livrable D1.3 pour une présentation du modèle utilisé, des options retenues, de la démarche suivie pour la construction des CMR et une analyse détaillée des résultats.

fourchettes de coûts classiques et 300 k€ environ par bus (hypothèse d'une flotte de 20 bus supplémentaires).

Les niveaux de fréquentation du BHNS ne sont pas spécifiés mais résultent des hypothèses d'attractivité que nous situons entre le bus classique et le tram.

Extension des lignes de tramway

L'agglomération de Grenoble dispose d'un réseau particulièrement fourni de tramway, avec de plus l'actuelle construction de la ligne E. La logique de cette mesure est donc de prolonger les lignes existantes afin de renforcer l'offre de transport en commun en site propre au-delà de l'hyper centre. Il s'agit davantage de faire bénéficier de ce réseau les couronnes de l'agglomération.

Le péage urbain

Un péage urbain est un dispositif de tarification de l'usage des véhicules particuliers qui vise à limiter ou rationaliser son utilisation. L'objectif est de réduire le trafic automobile pour limiter la place de la voiture en ville, diminuer les pollutions locales et globales, réduire la congestion et éventuellement générer des recettes pouvant être allouées à de nouvelles infrastructures de transport collectif.

L'avantage de ce type de dispositif est de limiter les externalités liées à l'usage de la voiture de façon a priori plus efficace que les dispositifs classiques de type réglementation du stationnement ou rationnement de la circulation. Pour ne pas s'apparenter à une simple taxe il importe toutefois que le péage urbain soit mis en place en complément d'une politique de transport collectif qui favorise le transfert modal tout en limitant le coût pour les ménages.

La question clé est ici celle du coût de l'infrastructure car ceux-ci sont extrêmement variables selon les dispositifs de contrôle mis en place. Ainsi pour Londres, l'installation de nombreuses caméras induit près de 160 M€ de coûts annuels d'exploitation alors qu'à Stockholm le choix d'une solution moins coûteuse permet de limiter le coût d'exploitation à 25 M€. Dans le cas de Grenoble, on retient a priori une option simplifiée basée sur des radio-émetteurs dont le coût d'exploitation pourrait être limité à 25 M€/an.

Le coût du péage est estimé à 2 ou 4€/j pour tout déplacement se situant dans la zone concernée suivant les scénarios. Les transferts modaux sont estimés par le modèle après calcul des coûts généralisés intégrant l'augmentation du coût d'usage de la voiture et l'évolution de la congestion (pour la voiture et les transports collectifs).

Véhicules électriques et hybrides

L'accélération du déploiement de véhicules individuels moins émetteurs de gaz à effet de serre vise à réduire les émissions dans les zones où un report modal vers les transports collectifs serait difficile à mettre en œuvre ou trop coûteux (les zones faiblement denses du territoire). Une évolution tendancielle des parts de marché des véhicules électrique et hybride est déjà intégrée dans le scénario de référence en 2030. L'objectif est donc de mettre en place à l'échelle locale des actions d'incitation pour dépasser le développement qui va résulter de l'évolution des prix relatifs essence / électricité, de l'action commerciale des constructeurs, et des dispositifs d'aide pouvant perdurer à l'échelle nationale.

Les mesures d'aide au déploiement envisagées consistent en subvention et/ou création d'infrastructures permettant le bon usage de ces véhicules. Elles comportent notamment l'installation d'infrastructures de recharge, des coûts de stationnement et/ou péage plus favorables (selon les scénarios), un accompagnement technique pour la réalisation d'infrastructures de recharge à domicile, etc...

Ces mesures sont différenciées selon les scénarios, la configuration la plus favorable aux véhicules électrique et hybride étant le scénario d'expansion urbaine où des alternatives aux transports collectifs sont nécessaires dans les zones les moins denses. Le coût total des mesures d'incitation est estimé se situer entre 10 et 15 M€ selon les scénarios.

Covoiturage

Les démarches d'incitation au covoiturage visent à améliorer le taux d'occupation des véhicules et donc à limiter le nombre de véhicules en circulation pour un même nombre de véhicules-kilomètres effectués. En moyenne le taux d'occupation pour les déplacements sur la région urbaine de Grenoble est de 1,3 ce qui laisse un potentiel d'accroissement très significatif compte tenu de la taille des véhicules. Nous simulons donc une inversion des tendances passées, en 20 ans le taux d'occupation passerait ainsi de 1,3 à 1,5. Par ailleurs, cette option semble réalisable dans une grande diversité de territoires alors que la création de réseaux de transport collectifs connaît des limites économiques dans les zones les moins denses.

La difficulté sur cette option dont les déterminants sont mal connus consiste à apprécier les coûts des moyens nécessaires à son déploiement (mise en place de plateformes d'échanges, de moyens de communication, de dispositifs sécurisés de paiement, etc...) et à formuler des hypothèses à la fois ambitieuses et réalistes d'augmentation des taux d'occupation. L'incertitude est donc très importante sur cette option, beaucoup plus que sur les autres mesures envisagées, car rien ne permet de garantir que les actions d'incitation mises en place seront suffisantes pour permettre d'atteindre les augmentations de taux d'occupation simulés.

Pour cette mesure nous avons estimé un coût global de mise en œuvre qui intègre la réalisation d'aires de covoiturage, des subventions aux premiers covoitureurs et des campagnes de communication à quelques millions d'euros (3.5M€).

Séquencement des options et construction des courbes de CMR

Rappelons que pour les raisons qui ont été évoquées dans la partie "méthodologie" de ce rapport, les mesures qui contribuent à la réduction des émissions du secteur transport (cela est vrai également pour les autres secteurs mais pas de façon aussi nette) ne peuvent pas être considérées comme indépendantes les unes des autres. Leur impact en termes de réductions d'émissions, et donc le coût de la tonne évitée, dépendent dans une large mesure des options déjà mises en œuvre.

Pour construire la courbe de CMR il faut donc paradoxalement définir auparavant une séquence logique établissant l'ordre dans lequel les mesures seront mises en place.

Le détail de la mise en place des mesures pour chaque scénario figure dans le livrable "Transports"¹². Nous n'explicitons ici que la séquence qui concerne le scénario de concentration urbaine pour illustrer la démarche qui a été appliquée à l'ensemble des scénarios.

1. BHNS

Ce paquet de mesures est le premier retenu car il se situe dans un contexte où des efforts importants ont déjà été engagés par l'agglomération de Grenoble pour développer le tramway sur les zones à fort potentiel conduisant à un endettement important de la collectivité. Le développement du BHNS peut permettre de prolonger cet effort, en cohérence avec le scénario de concentration urbaine, mais au prix d'un investissement moindre que pour le tramway. Il s'agit donc de rationaliser l'offre autour des lignes de tramway existantes avec une offre de bus plus structurante et plus attractive : augmentation de la vitesse moyenne, augmentation de la fréquence, amélioration de l'attractivité, renforcement des contraintes de stationnement.

2. Péage et stationnement

Le second paquet de mesures associe le durcissement de la politique de stationnement avec l'instauration d'un dispositif de péage urbain de zone (les résidents paient également pour utiliser leur véhicule). Ces mesures envisagées dans le cadre de la procédure ZAPA (Zone d'Action Prioritaire pour l'Air) ont un potentiel important de réduction des polluants locaux et des émissions de GES mais ne sont pas aisées à mettre en œuvre (acceptabilité). Elles interviennent après un développement de l'offre de transport collectif (BHNS) qui en accroît l'impact et facilite son acceptation.

3. Extension du tramway

L'extension des lignes de tramway (D, A et E) fait partie du programme d'infrastructure envisagé par le SMTC dans son travail de prospective à l'horizon 2025. Cet ensemble de mesures intervient à ce stade pour compléter une politique de renforcement de l'offre de transport collectif et de limitation de la voiture en cohérence avec le scénario de concentration urbaine. L'extension des lignes de tramway s'accompagne de contrats d'axe qui favorisent la densification de long du réseau, en particulier dans la 1^{ère} couronne dont la croissance est forte dans ce scénario, et d'une reconquête de la voirie au profit des modes de transports doux. L'investissement est par ailleurs rendu possible par les recettes procurées par le péage.

4. Véhicules électriques et hybrides

La logique de renforcement des transports collectifs a été privilégiée dans ce scénario de concentration urbaine. En complément, d'autres options doivent être envisagées pour les zones périphériques moins denses (en dehors de l'agglomération en particulier) où l'usage des véhicules individuels reste important. L'objectif est ici d'accélérer la transformation du parc au profit de véhicules moins émetteurs de GES en favorisant la création d'infrastructures de recharge notamment. Toutefois, les politiques de stationnement et de péage ne sont pas différenciées dans ce scénario qui tend à dissuader l'usage de la voiture particulière dans les zones denses de l'agglomération.

¹² Livrable D1.3

5. Covoiturage

Le développement du covoiturage présente un potentiel de réduction relativement élevé pour un coût de réalisation (direct) a priori limité. Mais malgré cela nous n'avons pas voulu le faire apparaître parmi les premiers paquets de mesures en raison de son caractère fortement incertain. Les informations pour l'instant disponibles sur le covoiturage ne permettent pas d'accorder à cette action le même degré de fiabilité qu'aux autres.

Calcul économique et prise en compte des externalités

La démarche retenue pour estimer le coût des mesures de réduction d'émissions consiste à réaliser un bilan économique entre deux situations, avec et sans mise en œuvre de la mesure considérée. Le modèle TRANUS ne fournit pas ce bilan économique mais il renseigne les variables de mobilité nécessaires à sa réalisation, variables qui sont complétées par des données de coût (investissements d'infrastructure, coûts d'usages, etc...). La base du calcul économique consiste donc à comparer les coûts complets (coûts d'investissement, coûts et recettes d'exploitation pour les transports collectifs et individuels) pour deux états du système avec et sans mesure, ou plus exactement à calculer le surcoût (éventuel) d'un état du système avec mesure par rapport à la situation de référence.

Ce premier calcul intègre à la fois les dépenses engagées par la collectivité pour les transports publics (investissements d'infrastructure, coûts d'exploitation, etc...) et les économies réalisées par les ménages sur l'usage des véhicules individuels (réduction des kilomètres parcourus ou amélioration et réduction de la congestion) mais il ne fournit qu'une information partielle sur l'intérêt économique de la mesure. L'impact éventuel du transfert modal vers les transports collectifs sur la réduction des externalités négatives liées à la voiture ne sont en effet pas pris en compte à ce stade.

Deux calculs complémentaires sont donc réalisés. Le premier intègre deux types d'externalités environnementales, le bruit et la pollution atmosphérique. Le second prend en compte une dimension supplémentaire importante, celle du temps, temps de déplacement mais également temps d'attente, qui sont des paramètres très importants pour les ménages ou les entreprises dans le choix d'un mode de transport (et leur localisation dans l'agglomération). Il y a donc plusieurs niveaux d'analyse des coûts des actions de réduction, permettant d'avoir la vue la plus complète possible

D'autres dimensions également importantes ne sont pas prises en compte. Par construction les émissions de CO₂ ne sont pas valorisées puisque l'objectif de la démarche est de calculer la valeur du carbone qui justifierait les différentes mesures étudiées d'un point de vue économique. Les surcoûts éventuels d'urbanisation associés à une option de développement des transports collectifs (densification autour des principaux axes) ne sont pas intégrés faute d'une connaissance suffisante des coûts et bénéfices associés. Enfin, des travaux complémentaires ont été réalisés pour intégrer les pertes de surplus associés au transfert modal (de la voiture vers les transports collectifs) ou au covoiturage et mieux refléter les comportements réels des automobilistes mais ces développements ne seront pas repris ici¹³.

¹³ Cf livrable D1.3

Les courbes de CMR pour les transports ; résultats et sensibilité

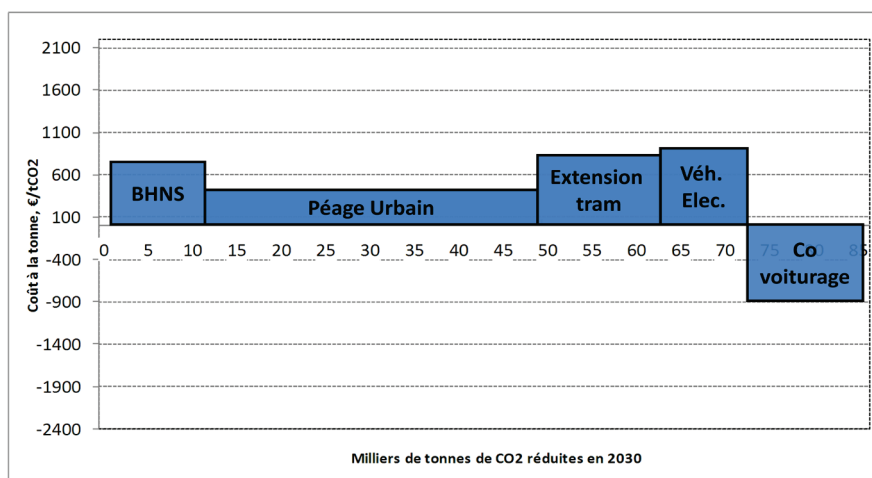
Les mesures retenues se traduisent par des transferts modaux vers les transports collectifs, des réductions d'usage de la voiture, etc ...

Avec la mise en œuvre du BHNS la vitesse moyenne des bus augmente de 2km/h, la fréquence s'accroît et leur attractivité s'améliore. L'offre augmente en conséquence de 16 % et la fréquentation de 37%. Au niveau de l'agglomération, la mesure réduit les émissions de près de 10 000 t CO2 en 2030, soit 3% par rapport aux émissions du secteur.

L'instauration d'un péage à l'intérieur du périmètre de la rocade entraîne un report massif sur les transports collectifs (+ 30% de passagers-km) essentiellement pour les déplacements courts (les déplacements de moins de 3 km en ville peuvent représenter jusqu'à 70% du total). Il en résulte une diminution importante du nombre de véhicules.

Les résultats auxquels conduit la démarche décrite ci-dessus sont illustrés sur la Figure 18 pour le scénario de concentration urbaine. La première observation que suscitent ces résultats concerne la forme de la "courbe". Comme expliqué précédemment, les options n'apparaissent pas ici classées par ordre de coût croissant mais selon un ordre d'implémentation qui renvoie à une logique de programme. Si les mesures sont mises en place dans l'ordre indiqué, alors les coûts de réalisation sont ceux qu'indiquent le graphique.

Figure 18: CMR Transports (sans externalités) – Scénario Concentration urbaine - TA=4%



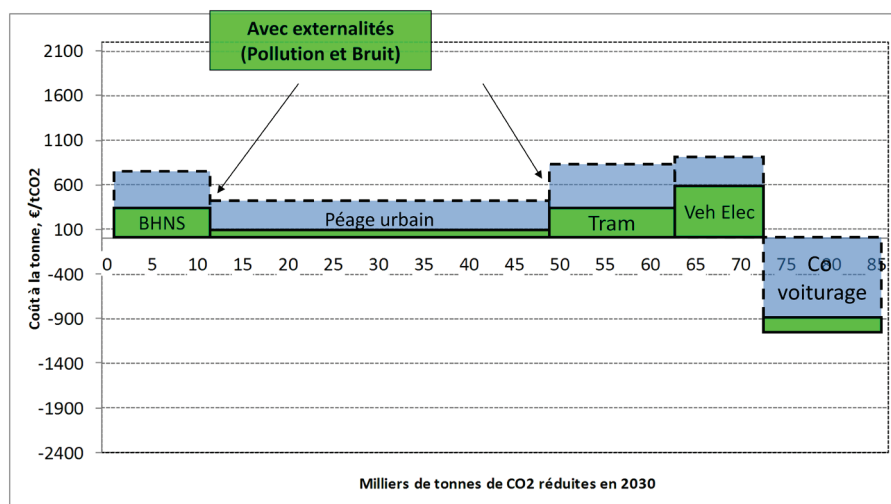
Le choix a été fait dans ce scénario de concentration urbaine de positionner le péage urbain après une mesure de développement des transports collectifs pour en améliorer l'efficacité mais on peut s'interroger sur la place du covoiturage. Le choix de faire apparaître le covoiturage en dernière position nous semble justifié par le caractère fortement incertain de cette option. En la plaçant en première position comme son coût unitaire le justifierait, nous aurions attribué à cette mesure un intérêt stratégique que nous ne pouvons pas affirmer. Elle figure néanmoins parmi les options que nous considérons potentiellement intéressantes mais sa place dans l'ordre de mérite reste à préciser.

La seconde observation est que l'ordre de grandeur des coûts obtenus est très supérieur aux valeurs habituellement retenues pour atteindre des objectifs de réduction compatibles avec le facteur 4 y compris dans le secteur des transports. La valeur tutélaire du carbone recommandée dans le rapport

Quinet (100 €/t en 2030) par exemple, est sensiblement inférieure aux valeurs obtenues ici. Nos résultats suggèrent que pour justifier au plan économique l'extension d'une ligne de tramway il faudrait que la valeur du carbone atteigne une valeur proche de 900 €/t. Si cette dernière valeur mesure l'intensité du signal qu'il faut introduire dans le secteur des transports pour orienter les comportements et choix technologiques sur des trajectoires compatibles avec le facteur 4, on peut s'interroger sur la pertinence d'engager des mesures de politique climatique dans ce secteur. Nous y reviendrons.

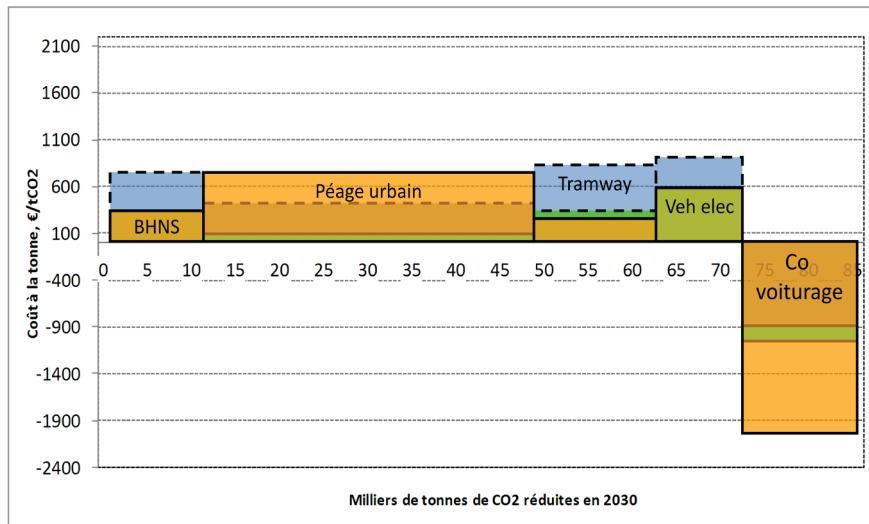
Enfin, on observera que si les coûts des trois premières options, hors péage, peuvent sembler relativement proches, ils sont en réalité extrêmement sensibles au périmètre considéré pour le calcul économique. Les résultats présentés sur la Figure 18 ne prennent en compte que les stricts coûts économiques, sans externalités et sans valorisation du temps. Ils sont très nettement modifiés lorsque l'on valorise les émissions de polluants et le bruit évités (Figure 19) et plus encore lorsque que l'on intègre la variable temps (Figure 20).

Figure 19: CMR Transports (avec externalités) – Scénario Concentration urbaine - TA=4%



Très logiquement, la valorisation des externalités environnementales évitées par le transfert modal de la voiture particulière vers les transports collectifs diminue sensiblement le coût des mesures étudiées : le coût collectif de la situation de référence qui fait un usage plus important des véhicules à moteur thermique (plus polluants et plus bruyants) augmente ; donc le surcoût de la situation avec mesure, diminue. Ainsi, le coût des bus en site propre est inférieur de 50% lorsque le bruit et la pollution évitées sont prises en compte pour atteindre un niveau de 370 €/tCO2. Le coût de la mise en place du péage urbain dont l'impact est plus important encore sur la motorisation individuelle diminue, lui, dans une proportion de 80% (Figure 19).

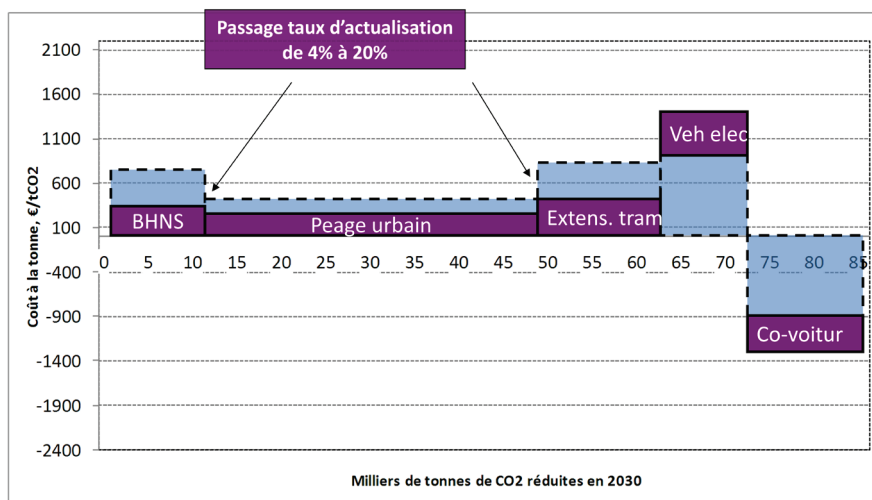
Figure 20: CMR Transports (avec externalités et prise en compte du temps) – Scénario Concentration urbaine - TA=4%



Avec l'introduction de la valeur du temps, la hiérarchie des options est à nouveau modifiée (Figure 20). Le péage urbain en particulier se traduit par un transfert modal massif vers les transports collectifs ce qui induit mécaniquement une augmentation des temps d'attente (pas de temps d'attente pour les véhicules individuels). Ainsi, même si le péage permet de limiter les engorgements, d'améliorer la fluidité du trafic et de réduire le temps de déplacement, il se traduit par une augmentation globale des temps de trajet et donc une augmentation très importante du coût complet.

A titre d'exemple, une augmentation du temps de déplacement et du temps d'attente de 1% sur la période de pointe du matin entraîne une augmentation du coût des options de quelques 700 €/t. Cette sensibilité des résultats à la variable temps est un problème général pour l'ensemble des modèles transport qui fragilise les résultats économiques auxquels ils conduisent.

Figure 21: CMR Transports (sans externalités) – Scénario Concentration urbaine - TA=20%



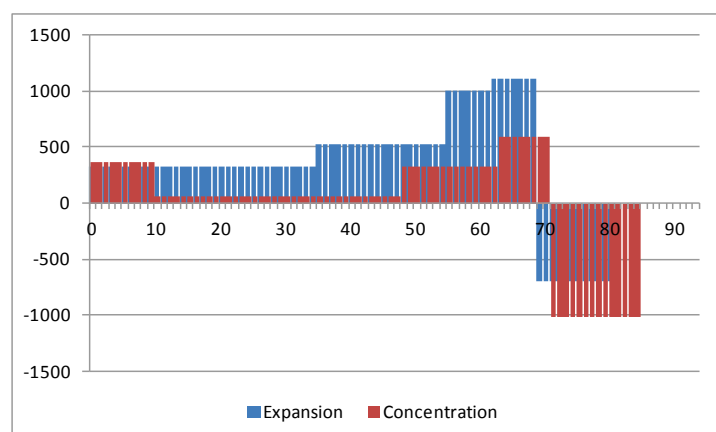
Enfin, la Figure 21 présente l'impact d'une modification du taux d'actualisation (on ne modifie ici que le taux d'actualisation des ménages et pas celui de la collectivité publique qui investit dans les infrastructures de transport, supposé inchangé à 4%). La conséquence d'une augmentation du taux d'actualisation des ménages est une augmentation du coût de la mesure lorsqu'elle impose l'achat de véhicules, comme c'est le cas pour l'option véhicules électriques. A l'inverse, cette même augmentation se traduit par une réduction du coût pour les ménages lorsque la mesure conduit à une réduction du taux de motorisation comme c'est le cas pour l'option BHNS ou le péage, par exemple (l'hypothèse d'un TA plus élevé est utilisée pour tous les véhicules, pas simplement les électriques, et majore donc globalement le coût du kilomètre automobile). Les résultats sont donc logiquement sensibles au taux d'actualisation utilisé par les ménages avec un impact contrasté par rapport à l'importance des investissements privés associés à chaque mesure.

Impact des scénarios : forme urbaine et politique des transports

Les résultats présentés ci-dessus ne concerne que le scénario de concentration urbaine mais des résultats identiques ont été produits pour les trois scénarios structurants (concentration urbaine, renforcement multipolaire et expansion urbaine). Que nous apprennent-ils ?

Lorsqu'on superpose les deux courbes obtenues pour les scénarios d'expansion et de concentration urbaine (Figure 22) qui sont du point de vue des transports, les deux configurations les plus contrastées, on observe que la courbe correspondant à un renforcement de l'étalement urbain se situe au dessus de la courbe correspondant à un accroissement de la densité urbaine. Pour atteindre un objectif identique de réduction d'émissions, il faudra mobiliser des options dont le coût marginal sera plus élevé dans la configuration d'expansion urbaine. Ce qui signifie que la stratégie de concentration urbaine serait moins coûteuse du point de vue de la politique climatique. Ce résultat ne peut toutefois pas être validé car il dépend des paramètres considérés pour le calcul du coût des options. Ainsi, la prise en compte du paramètre temps pour la construction des CMR produit des courbes dont la superposition ne fait plus apparaître de façon aussi nette un avantage pour une configuration urbaine plutôt qu'un autre.

Figure 22: CMR Transports (avec externalités environnement) – Scénarios Concentration /Expansion - TA=4%

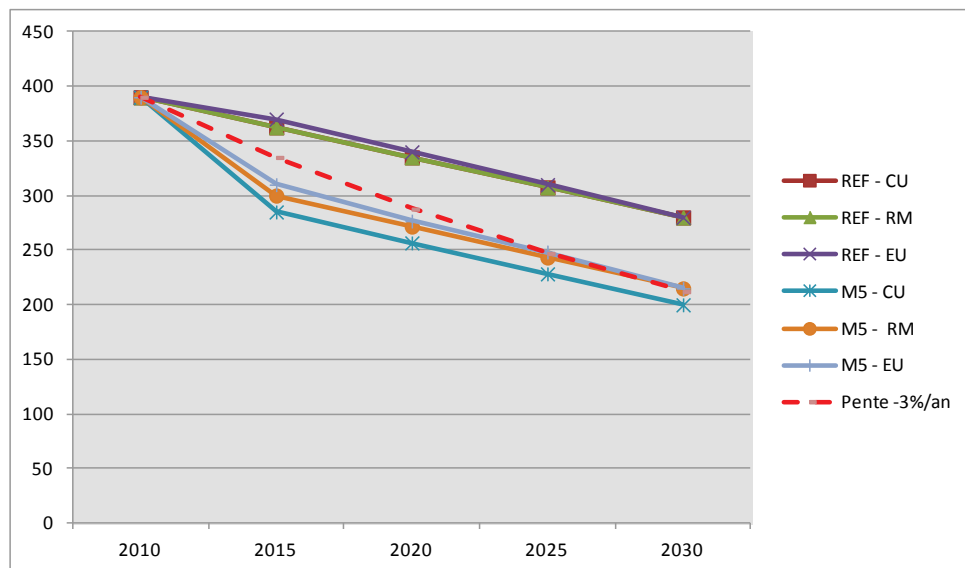


La comparaison entre les trois scénarios d'évolution de la forme urbaine peut aussi être réalisée du point de vue de l'évolution des trajectoires d'émissions, dans la situation de référence d'une part, et en mettant en œuvre la totalité des options de réduction identifiées d'autre part.

Dans les scénarios de référence, les consommations d'énergie et émissions de CO₂ diminuent de près de 25% entre 2010 et 2030. Rappelons que la tendance est à une stabilisation des émissions du transport depuis quelques années sur l'agglomération de Grenoble (Métro, 2009) en raison d'une faible croissance démographique, d'une hausse progressive de l'usage des transports collectifs et d'une amélioration des performances du parc de véhicules individuels). La baisse anticipée à 2030 est liée à la poursuite des tendances démographiques et économiques, à l'évolution croissante des prix des carburants (cf partie scénarios structurants), au progrès technique sur les véhicules thermiques, à l'émergence des véhicules électrique et hybrides, etc. L'ensemble de ces facteurs induit une diminution progressive des émissions, indépendamment de la politique climatique locale (Figure 23).

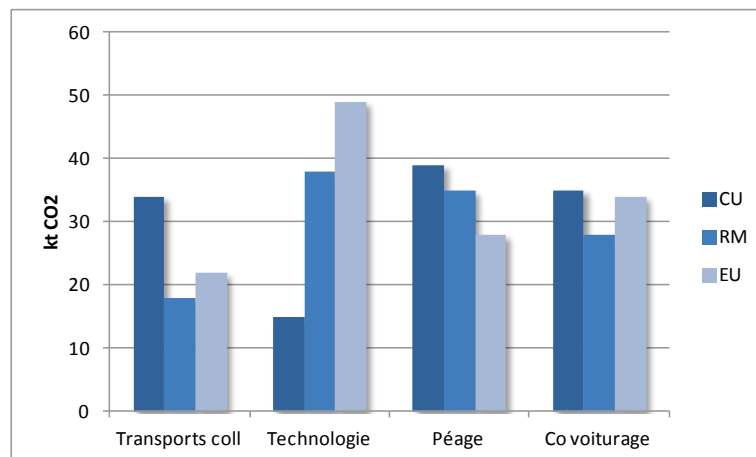
La simulation en prospective avec la mise en place des cinq mesures clés identifiées pour le secteur des transports dans le modèle TRANUS, sur la période 2010-30, permet d'obtenir des réductions d'émissions supérieures à 45% en 2030 par rapport à 2010. A titre de comparaison, cette réduction positionnerait l'agglomération sur une trajectoire proche de celle décrite par la loi Grenelle qui se base sur une diminution de 3%/an pour un objectif de facteur 4 en 2050.

Figure 23: Trajectoires d'émissions – Référence et 5 mesures pour les 3 scénarios



L'autre observation importante est que les résultats auxquelles conduisent ces simulations sont du point de vue des trajectoires d'émissions peu différenciés selon les scénarios (sur le périmètre de l'agglomération, l'écart entre les scénarios d'étalement et de concentration urbaine n'est que de 1.5% pour la référence, et de 6% avec les 5 mesures). Un tel écart peut sembler très faible compte tenu des hypothèses très contrastées introduites sur les évolutions des emplois et de la localisation des ménages. Pour obtenir des résultats plus contrastés sur l'influence des formes urbaines il aurait été nécessaire d'adopter un horizon temporel plus lointain ou un périmètre d'analyse élargi. Nos résultats sur le périmètre du SCOT indiquent par exemple une réduction supplémentaire des émissions en 2030 de l'ordre de 9% par rapport aux deux autres trajectoires. Cela reste toutefois une différence assez modeste. On observe par ailleurs des résultats plus contrastés lorsqu'on examine la contribution respective des différentes mesures selon les scénarios. La Figure 24 montre ainsi que, dans le scénario de concentration urbaine, la contribution des transports collectifs est plus importante et celle de l'amélioration des véhicules individuels, plus limitée.

Figure 24: Réductions d'émissions par type de mesure – Echelle SCOT – Ref 2030



A l'échelle de l'agglomération, la concentration urbaine sur ce territoire implique davantage de populations et donc davantage de kilomètres parcourus. Même si des mesures sont mises en œuvre pour réduire les émissions de chaque kilomètre parcouru, cela explique donc logiquement un contraste faible entre scénarios à cette échelle. Plus fondamentalement, cela montre la grande inertie dans les consommations d'énergie et les émissions associées, liée au parc bâti (s'il n'y a pas de démolitions, 80% du parc de 2030 existe déjà en 2010) et au parc de véhicules dans une moindre mesure, aux infrastructures de transport et aux comportements (taux d'occupation des véhicules par exemple).

Cela relativise donc l'importance existante à produire des formes compactes du point de vue des politiques climatiques, d'autant plus si l'on prend en compte les incertitudes sur les coûts de telles politiques urbaines (non comptabilisées ici). Il y a bien des réductions à attendre d'une densification et cela constitue un des leviers utiles et nécessaires, mais il n'est pas forcément l'outil le plus performant. Il est toutefois clair que certains potentiels devraient être mieux utilisés du fait de leur proximité aux emplois et aux réseaux de transport. Par ailleurs, il est essentiel d'éviter que des ménages modestes fassent des choix de localisation (franges périurbaines) entraînant une grande vulnérabilité aux hausses du prix de l'énergie du fait d'importants kilométrages quotidiens. Enfin, il faut considérer le temps long, l'aménagement d'aujourd'hui structure les coûts futurs. Les outils développés dans ce projet sont utiles pour identifier les développements les plus profitables du point de vue des réductions des émissions.

Il est également intéressant de comparer les scénarios du point de vue des bilans socio économiques. Sur ce plan les écarts sont beaucoup plus significatifs. Le tableau suivant présente le bilan actualisé des coûts complets de la mise en œuvre des cinq mesures pour les trois scénarios. On retrouve des résultats déjà observés lors de la présentation des courbes de CMR : la prise en compte des externalités (bruit et pollution locale) diminue le coût global des scénarios ; de même, la valorisation du temps diminue le coût des scénarios lorsque l'amélioration des temps de déplacement compense l'augmentation des temps d'attente (S2 et S3) mais produit l'effet inverse lorsque le temps total augmente (dans S1, les reports modaux sont massifs et les temps d'attente dépassent les gains de temps de déplacement).

Le Tableau 8 permet également une comparaison entre les coûts des différents scénarios et si l'on s'en tient au coût économique, avec et sans externalités, on observe que le coût du scénario de

concentration urbaine est sensiblement inférieur à celui des autres scénarios. La suppression du covoiturage (option très favorable mais fortement incertaine) réduit les écarts entre les scénarios mais ne modifie pas les tendances : le scénario de concentration urbaine reste un scénario qui permet une réduction des émissions comparable ou légèrement supérieure à celle que procure les autres scénarios, mais pour un coût sensiblement inférieur.

Tableau 8: Bilan socio-économique – 3 scénarios (avec/sans covoiturage)

5 mesures (en M€)	Coût économique	avec externalités	avec ext. et valeur temps
S1 Concentration Urbaine	238	-118	534
S2 Renforcement Multipolaire	574	295	193
S3 Expansion urbaine	575	286	47
4 mesures (sans co-voiturage) (en M€)	Coût éco	Coût éco + Externalité	Coût éco + Ext + Temps
S1 Concentration Urbaine	427	165	433
S2 Renforcement Multipolaire	636	425	240
S3 Expansion urbaine	650	440	195

Une dernière observation, mais elle est essentielle : tous les bilans économiques présentés dans le tableau sont positifs (sauf pour le scénario de concentration urbaine avec externalités) et plus encore lorsque l'on supprime l'option de covoiturage. Ils induisent donc un coût pour la collectivité de l'ordre de 430 à 650 M€ si on exclue l'option covoiturage. Si on valorise les pollutions locales évitées ou la réduction du bruit (externalités) que permet la diminution de la motorisation individuelle et/ou le transfert modal vers les transports collectifs, les bilans s'améliorent mais les bénéfices économiques n'équilibrent toujours pas les dépenses associées aux mesures engagées. Pour être complète, l'analyse doit toutefois tenir également compte des émissions de CO₂ évitées, non valorisées ; en affectant les émissions évitées d'une valeur du carbone conforme à celle que suggère le rapport Quinet (100 €/tCO₂), les bilans s'améliorent de 50 à 80 M€.

Cette dernière observation appelle plusieurs commentaires :

- Sur l'agglomération de Grenoble, la politique d'investissements massifs réalisée depuis 20 ans (plusieurs lignes de tramway) a en grande partie exploité les potentiels de réduction d'émissions à faible coût.
- Les options de transport collectif (BHNS et tramway) envisagées, ainsi que le péage, entre partiellement en concurrence et pourraient probablement être optimisées pour en limiter le coût.
- L'option péage urbain induit une "perte" de temps importante du fait du transfert modal vers les transports collectif ; malgré les gains importants sur la pollution locale et l'amélioration de la fluidité du trafic, le bilan temps de déplacement plus temps d'attente reste favorable à la voiture et produit un bilan négatif.

En conclusion, on retiendra que les coûts de réduction auxquels on arrive sont à la fois, élevés, relativement proches pour les différentes mesures envisagées et assez sensibles aux hypothèses retenues pour le calcul (avec / sans externalités, avec / sans valorisation du temps, valeur du taux

d'actualisation). Les niveaux de coûts de réduction obtenus qui s'appuient sur des mesures assez volontaristes (politiques urbaines structurantes, programmes importants en faveur des bus et tramways, péage urbain très volontariste, hypothèses favorables de diffusion des nouveaux véhicules, etc.) montrent l'importance des efforts qu'il faudra consentir pour se placer sur des trajectoires compatibles avec le facteur 4 dans le secteur des transports. Enfin, si la contribution de la forme urbaine à la réduction des émissions restera modeste (sur le périmètre et à l'échelle de temps considérés), on peut toutefois observer que les résultats sont plutôt favorables au scénario de concentration urbaine qui améliore l'efficacité des mesures favorables aux transports collectifs.

2. Le secteur du bâtiment

Cette partie décrit la démarche suivie pour l'élaboration des courbes de CMR dans le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) : caractérisation du parc de l'agglomération, identification des options techniques, construction des courbes CMR (modèle MOBAT) et analyse des résultats. L'objectif étant d'identifier les potentiels coût-efficaces, le choix a été fait après une première analyse de s'intéresser en priorité aux potentiels de réduction situés dans le parc de bâtiments existant. Les potentiels de réduction dans le parc construit après 2010, très peu importants et à coûts très élevés en raison des performances énergétiques élevées des bâtiments neufs, n'ont pas été considérés¹⁴.

Caractérisation du parc de bâtiments

Contrairement à nombre de collectivités locales européennes, les villes françaises ne disposent pas des données nécessaires pour l'établissement d'un bilan énergétique détaillé par énergie et par secteur. Cette information doit être construite à partir des données disponibles et en l'occurrence pour les logements à partir des enquêtes INSEE qui décrivent pour les petites communes la totalité des ménages et pour les grandes un pourcentage significatif (40% des ménages). Y figurent les données nécessaires à la caractérisation des logements :

- la nature du logement (appartement ou maison individuelle)
- la taille du logement
- le type de chauffage (individuel ou collectif)
- la source d'énergie utilisée (fioul, gaz, électricité, chauffage urbain, autres)

Tableau 9: Base de données bâtiments (source INSEE)

Insee	Commune	Age	Type chauff	Combustible	Surface	Surf unit	Type	Catégorie
2	Domène	av 1975	CEI	ELE	40 à 70 m ²	55	APPART	Principale
2	Domène	1982 à 1989	CEI	ELE	70 à 100 m ²	84	MAISON	Principale
2	Domène	1982 à 1989	CEI	ELE	100 à 150 m ²	120	MAISON	Principale
2	Domène	1975 à 1981	AUTRE	AUTRE	100 à 150 m ²	120	MAISON	Principale
2	Domène	av 1975	CCC	FUL	40 à 70 m ²	55	APPART	Principale
2	Domène	av 1975	CCC	GZN	40 à 70 m ²	55	APPART	Principale
2	Domène	av 1975	CCC	FUL	40 à 70 m ²	55	APPART	Principale
2	Domène	av 1975	CCC	AUTRE	40 à 70 m ²	55	APPART	Principale
2	Domène	av 1975	CCC	GZN	40 à 70 m ²	55	APPART	Principale
2	Domène	av 1975	CCC	GZN	70 à 100 m ²	84	APPART	Principale
2	Domène	1975 à 1981	CCI	FUL	100 à 150 m ²	120	MAISON	Principale

¹⁴ Voir le livrable D2.4 pour une présentation complète de la démarche et l'analyse des résultats sectoriels.

L'exploitation de ces données permet d'obtenir une description précise du parc de logements de l'agglomération avec le nombre d'appartements et de maisons individuelles par classe d'âge et par type d'énergie de chauffage principal ainsi que les surfaces moyennes de ces logements. On observe que la structure du parc se modifie selon les périodes ; plus de la moitié des appartements construits entre 1982 et 1999 ont ainsi opté pour un chauffage électrique, alors que dans la période suivante, ce mode de chauffage a diminué au profit du gaz et du réseau de chauffage urbain. Pour les maisons individuelles, les sources fossiles prédominent dans les constructions anciennes moins bien isolées, puis sont remplacées par l'électricité et par le gaz sur la période récente.

Tableau 10: Energies de chauffage – parc de maisons individuelles (% de logements)

% de maisons	Gaz	Fioul	Electricité	Bois	Total
Avant 1945	52%	21%	14%	12%	100%
1945 - 1974	49%	33%	14%	5%	100%
1975 – 1981	28%	17%	47%	9%	100%
1982 - 1999	46%	6%	37%	12%	100%
Après 2000	62%	5%	23%	9%	100%

Les logements construits avant 1974 (date des premières réglementations thermiques) qui sont à la fois moins bien isolés et principalement chauffés par des énergies fossiles sont ceux sur lesquels les enjeux sont les plus importants. Ils représentent dans l'agglomération 64% du parc, soit environ 115.000 logements (la répartition est identique entre les appartements et les maisons individuelles). L'analyse détaillée par communes montre que Fontaine, Saint-Egrève et Seyssinet-Pariset possèdent la plus grande part de logements anciens alors qu'Echirolles possède à l'inverse un parc de logements plus récents.

Une autre source d'information (le logiciel PROMODUL exploité par le CSTB) permet d'estimer les consommations unitaires et les émissions de CO₂ pour différentes classes de logements¹⁵. En combinant des données avec les caractéristiques physiques sur parc il est possible de reconstituer pour l'ensemble du parc de logements les consommations d'énergie de chauffage (et émissions de CO₂).

Il n'est malheureusement pas possible de suivre la même démarche pour estimer les consommations d'énergie des bâtiments du secteur tertiaire car les données disponibles sont beaucoup moins détaillées que pour le résidentiel. La méthode retenue consiste, à partir de la connaissance du nombre d'emploi par grandes catégories, à appliquer un ratio de type « surface de bâtiment par emploi », et à estimer ainsi la taille du parc pour l'ensemble de l'agglomération. La méthode ne permet toutefois pas de connaître l'âge des bâtiments ce qui rend plus difficile l'estimation des consommations par unité de surface par analogie avec le résidentiel. Cette dernière s'effectue donc en combinant des données nationales ou des données plus partielles (statistiques émanant du chauffage urbain par exemple) sur la ventilation par énergie et consommations unitaires en lien avec les grandes catégories d'usage des bâtiments (base de données Odysée, Enerdata): hôtels / restaurants, santé, enseignement, administration, commerce, bureaux. Une hypothèse a également été retenue sur le fait que le potentiel de gain dans le tertiaire était proportionnel à celui qui pouvait

¹⁵ Voir le livrable D2.2

être atteint dans le résidentiel, modulo la consommation unitaire. Ainsi, les informations de base qu'il est nécessaire d'estimer pour ces bâtiments tertiaires sont : la surface totale, la consommation unitaire. Le gain en terme d'émissions de CO₂ qu'il est possible de réaliser est estimé en combinant ces deux informations et par croisement avec les résultats sur le résidentiel.

Tableau 11: Consommations d'énergie de chauffage / Emissions CO₂ (chauffage) du parc de bâtiments

	Surface		Conso unitaire		Conso totale		Emissions de CO ₂	
	Mm ²	%	KWh/m ²	%	GWh	%	ktCO ₂	%
Appartements	9,2	42%	147		1350	39%	282	37%
Maisons	3,7	17%	182		674	20%	153	20%
Tertiaire	8,8	41%	161		1420	41%	323	43%
Total	21,7	100%	159		3444	100%	758	100%

Le parc de bâtiments de l'agglomération de Grenoble est constitué pour 60% (en surfaces) de logements et pour 40% de bâtiments tertiaires ; les logements collectifs représentent seuls près de la moitié de la surface totale de bâtiments. La répartition des consommations d'énergie entre les logements et les bâtiments tertiaires est très proche de la répartition des surfaces mais le poids des maisons individuelles est supérieur à leur part des surfaces de logements en raison de consommations unitaires plus élevées.

Les options techniques de rénovation

On peut identifier deux grandes options pour réduire les émissions de CO₂ liées aux consommations de chauffage des bâtiments : traiter l'enveloppe du bâtiment pour réduire les déperditions énergétiques, améliorer les rendements des moyens de production de chaleur et remplacer les sources d'énergie utilisées par d'autres moins émettrices de GES. Les options qui consistent à modifier les facteurs d'émission des sources d'énergie utilisées (accroissement de la part des sources renouvelables dans la production de chaleur réseau, par exemple) en sont pas traitées ici mais dans la partie "réseaux énergétiques".

Cinq types de travaux de rénovation thermique ont été envisagés :

- isolation des façades
- remplacement des fenêtres
- isolation des toitures
- installation de systèmes de ventilation
- et isolation des planchers bas.

Nous avons, de façon générale, retenu l'option de l'isolation par l'extérieur pour les bâtiments construits après 1945 pour des raisons de meilleure performance (réduction des ponts thermiques). Pour les bâtiments d'avant 1945, en revanche, nous avons considéré que l'isolation serait réalisée par l'intérieur pour préserver leur qualité architecturale.

En ce qui concerne le renouvellement des installations de chauffage, les options envisagées dépendent des solutions techniques déjà en place (chauffage à eau chaude ou air chaud). Dans les appartements, les chaudières gaz en place peuvent être remplacées par des chaudières performantes à condensation ou selon les cas par un raccordement au réseau de chaleur (lorsque la densité de demande de chaleur justifie son extension et que l'immeuble est déjà desservi par une

installation de chauffage collectif ; cf infra) ou par une installation de pompe à chaleur. Dans les maisons individuelles, l'option réseau de chaleur n'a pas été envisagée, seule l'installation d'une chaudière à condensation ou d'une pompe à chaleur sont considérées. L'option chauffage au bois individuel n'a pas non plus été retenue en raison des problèmes actuels d'environnement associés à cette ressource (problèmes d'émissions de particules fines mais qui pourraient éventuellement évoluer avec l'apparition de nouvelles technologies types granulés ou plaquettes).

Dans un premier temps, ces différentes options ont été appliquées de façon individuelle sur l'ensemble des types de bâtiments résultant de l'analyse du parc (logement individuel ou collectif, 5 classes d'âge, 5 sources d'énergie et modes de chauffage) à l'aide du logiciel Promodul exploité par le CSTB qui calcule l'impact de chaque opération en termes de réduction des consommations d'énergie et d'émissions de CO₂¹⁶. Un premier ordre de mérite mixant critères économiques et techniques (remplacement du dispositif de chauffage après réalisation de l'isolation pour un dimensionnement optimal) a ainsi été réalisé de façon à réajuster les performances de chaque option en tenant compte des options réalisées auparavant.

Le coût des opérations a également été estimé sur la base d'un coût complet, sauf pour l'isolation par l'extérieur où la méthode retenue combine coût complet et coût additionnel. Le retour d'expérience de l'OPATB sur Grenoble montre en effet que l'obligation de ravalement joue un rôle important dans la décision de réalisation de travaux d'isolation par l'extérieur. Dans le cas d'une opération couplant ravalement et isolation extérieure, un tiers seulement du coût total est lié à l'isolation ce qui améliore fortement la rentabilité économique de cette opération. Pour les calculs d'isolation par l'extérieur, le coût retenu est donc le coût additionnel par rapport à une opération de ravalement. Le tableau suivant présente, à titre d'information, les coûts complets des options de rénovation pour deux types de logements (maison de 110 m² et logements collectifs de 110 m² sur 7 niveaux pour une surface totale de 2100 m²).

Tableau 12: Coût complets des options de rénovation pour les logements

	Appartement de 60 m ²	Maison de 110 m ²
Isolation des façades		9,5 k€
Changement de fenêtres	1,9 k€	7,0 k€
Isolation de la toiture	0,9 k€	1,4 k€
Installation d'une VMC double flux	2,7 k€	1,3 k€
Isolation des planchers bas	0,4 k€	-

Pour les mêmes raisons qui ont imposé de raisonner sur des paquets de mesures dans le secteur des transports, nous avons été conduits à envisager le regroupement de différentes mesures dans le secteur du bâtiment pour contourner les difficultés liées à l'ordonnancement des travaux. Compte tenu du grand nombre d'options disponibles (isolation façades, toiture, fenêtres, remplacement chaudière, substitution d'énergie) à coupler avec une typologie détaillée du parc, la construction puis la lecture des courbes de CMR aurait été trop complexe. La décision a donc été prise de regrouper les options techniques pour ne conserver que des paquets de mesures s'appliquant à des parties distinctes du parc et de ce fait totalement indépendants les uns des autres.

¹⁶ Livrable D2.2

Les options considérées in fine pour les logements collectifs sont fonction des énergies de chauffage utilisées. Pour les appartements chauffés au gaz, la solution privilégiée dans 60% environ des cas intègre une rénovation thermique complète (isolation par l'extérieur sauf bâtiments avant 1974) et le remplacement de la chaudière par une chaudière gaz à condensation. Pour les appartements situés dans les zones desservies ou à proximité du réseau de chaleur (concerne environ 20% des cas¹⁷), le passage au chauffage urbain est une option possible (si rentable) sans toutefois d'action de rénovation thermique complète car le coût des réductions additionnelles d'émissions est alors très élevé. Enfin, pour le parc ancien sur lequel la rénovation thermique complète serait très coûteuse, le passage à la pompe à chaleur fait également partie des options accessible sans investissement complémentaire d'isolation¹⁸ (concerne environ 20% des cas).

Dans le cas des logements individuels chauffés au fioul ou au gaz naturel, le principal paquet de mesure comporte une isolation complète (par l'extérieur) et le renouvellement de la chaudière pour un modèle plus performant. Pour les maisons qui présentent un coût de rénovation thermique élevé (30% du parc estimé), on considère comme pour les logements individuels, le passage à une énergie de chauffage peu carbonée avec un dispositif de chauffage performant tel que la pompe à chaleur.

Pour tous les logements chauffés à l'électricité ou raccordés au chauffage urbain, l'isolation complète est envisagée. Enfin, les maisons individuelles peuvent également bénéficier d'une installation d'eau chaude sanitaire solaire.

Construction des courbes de CMR : le modèle MOBAT

La construction des courbes de CMR pour le secteur du bâtiment s'est appuyé sur le modèle MOBAT (Modélisation de la demande de chauffage des BAtiments du Territoire). Il s'agit d'un modèle technico économique constitué de quatre modules :

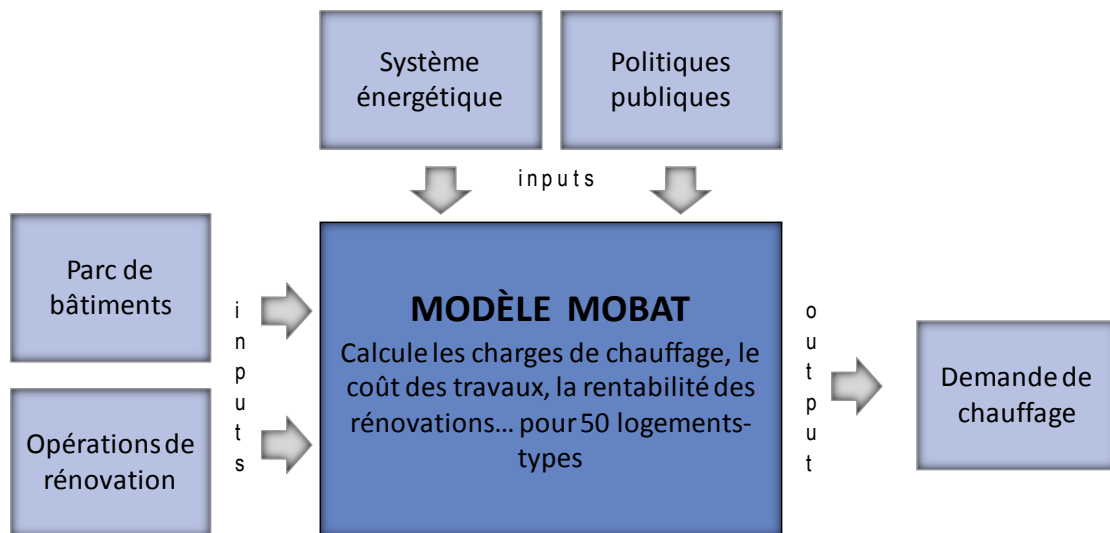
- un module « Parc de bâtiments » qui décrit l'état du parc au moyen de 40 catégories de logements. Pour le résidentiel, chaque immeuble est décrit selon son âge (date de construction) et l'énergie utilisée pour le chauffage (gaz collectif, gaz individuel, fioul, bois, électricité, chauffage urbain). Pour chacune des catégories, les surfaces en mètre carré sont identifiées, par logement et pour l'ensemble du parc. Ces statistiques sont accessibles à un niveau géographique fin (Iris, Communes...), ce qui permet d'appliquer la démarche sur différents périmètres administratifs français. Pour le tertiaire, l'information disponible pour décrire le parc est nettement moins précise.
- un module « Opérations de rénovation » qui décrit les opérations élémentaires que l'on peut engager (cf supra). Les opérations de rénovation ou paquets de mesures sont renseignés en termes de coût, de durée de vie, et d'impact sur la consommation d'énergie. La séquence des opérations est prise en compte pour tenir compte des mesures qui ont été mises en œuvre auparavant.

¹⁷ L'estimation de 20% a été faite pour Grenoble en estimant, quartier par quartier, le nombre d'immeubles chauffés au gaz collectif, et donc susceptibles de migrer vers le chauffage urbain car étant déjà équipé d'un système de chauffage central

¹⁸ Ce choix est volontaire de limiter l'action à la substitution entre énergie pour disposer d'une option de réduction d'émissions à faible coût (le passage à la PAC permet de réduire de 80% les émissions d'un chauffage existant au gaz). Le couplage de la substitution avec une rénovation thermique permettrait de réduire la consommation d'énergie mais conduirait à un coût de la tonne évitée très supérieur.

- un module « Evolution du système énergétique » décrit l'évolution du système énergétique avec notamment l'évolution des prix des énergies de chauffage (gaz, fioul, électricité...), et l'évolution du contenu CO2 pour l'électricité et le chauffage urbain.
- enfin, un module « Politiques publiques » décrit les éventuels dispositifs d'incitation qui peuvent être mis en place pour aider à la rénovation des bâtiments, ainsi que le montant d'une éventuelle taxe carbone sur les énergies fossiles.

Figure 25: Structure du modèle MOBAT



Pour chaque paquet de mesures (un paquet de mesure désigne un type de bâtiments et une option de rénovation tel que décrite ci-dessus), le modèle calcule la rentabilité économique de l'opération pour des valeurs carbone croissantes par pas de 10 €/t dans un cadre de référence donné (taux d'actualisation, dynamique d'évolution des prix des énergies). En procédant de façon incrémentale, le modèle permet d'identifier pour chaque option technique la valeur carbone qui équilibre investissement de rénovation et économies de charges de chauffage. Cette valeur carbone correspond au coût marginal de l'option considérée. Les options se caractérisent alors par une quantité de réduction d'émissions (on suppose que l'option lorsqu'elle est rentable se généralise à l'ensemble du parc de bâtiments ayant les mêmes caractéristiques) et un coût marginal qui permettent de construire une courbe de CMR.

Les informations disponibles sur les caractéristiques du parc de bâtiments tertiaire étant très limitées (âge et modes de chauffage en particulier ne sont pas connus de façon précise), nous faisons l'hypothèse, en première approximation, que celles-ci sont comparables à celles du parc de logement de façon à pouvoir intégrer le potentiel associé au tertiaire dans la courbe de CMR. Le CSTB a par ailleurs fourni des informations sur les coûts de rénovation dans le tertiaire par secteur d'activité.

Les potentiels de réduction d'émissions dans le secteur du bâtiment

La démarche décrite ci-dessus permet de reconstituer les potentiels présentés dans le Tableau 13 pour les logements collectifs, individuels et le tertiaire. Le tableau présente pour chaque catégorie de bâtiments, les quantités de CO2 qui peuvent être évitées en mobilisant l'ensemble des options techniques listées sans prise en compte du caractère économique ou non de ces options.

Le potentiel total de réduction d'émissions pour l'ensemble du secteur représente 500 ktCO₂, en considérant la totalité des mesures visant à réduire les émissions liées au chauffage des locaux (et en eau chaude sanitaire solaire). Rappelons que les émissions des bâtiments (résidentiel et tertiaire) de l'agglomération pour les seuls usages de chauffage sont de 760 kt pour l'année 2010, soit un potentiel de réduction de 66%. Malgré une contribution aux émissions totales de l'ordre de 42%, le tertiaire représenterait près de 47% potentiel de réduction identifié ici. On ne dispose malheureusement pas de données sur l'âge du parc des bâtiments tertiaires mais il est très probable que les principales options de réduction d'émissions concerneraient comme pour les logements, le parc ancien : pour les maisons, le parc récent (post 2000) ne représente que 2% du potentiel total, alors que le parc ancien (avant 1974) représente 81% et les valeurs sont respectivement de 2% et 86% pour les appartements. Très clairement, l'essentiel de l'effort de réduction des émissions doit donc se concentrer sur le parc ancien (tertiaire y compris) pour des raisons de potentiel disponible mais également pour des raisons d'efficacité économique puisque les coûts des options de réduction sont nettement inférieurs dans le parc ancien.

Tableau 13: Potentiels de réduction d'émissions pour les bâtiments

Logements collectifs	Mode de chauffage initial	CO2 évité		
		avant 74	entre 74 et 99	après 2000
Isolation + Nouvelle chaudière gaz	gaz	62,0 ktCO ₂	7,4 ktCO ₂	1,1 ktCO ₂
Passage au chauffage urbain	gaz	37,0 ktCO ₂	4,5 ktCO ₂	0,4 ktCO ₂
Passage à la pompe à chaleur	gaz	25,7 ktCO ₂	4,7 ktCO ₂	1,3 ktCO ₂
Isolation	ch. urbain	9,7 ktCO ₂	1,4 ktCO ₂	0,2 ktCO ₂
Isolation	électricité	8,0 ktCO ₂	2,5 ktCO ₂	0,1 ktCO ₂
Total =		134,4 ktCO ₂	19,5 ktCO ₂	3,0 ktCO ₂
Maisons individuelles	Mode de chauffage initial	CO2 évité		
		avant 74	entre 74 et 99	après 2000
Isolation + Nouvelle chaudière gaz	gaz/fioul	43,1 ktCO ₂	5,8 ktCO ₂	0,5 ktCO ₂
Passage à la pompe à chaleur	gaz/fioul	24,7 ktCO ₂	4,5 ktCO ₂	0,5 ktCO ₂
Isolation	électricité	3,1 ktCO ₂	2,3 ktCO ₂	0,1 ktCO ₂
Chauffe-eaux solaires sur toiture	-	7,1 ktCO ₂	4,3 ktCO ₂	0,6 ktCO ₂
Total		78,0 ktCO ₂	16,9 ktCO ₂	1,7 ktCO ₂
Bâtiments tertiaires	Mode de chauffage initial	CO2 évité		
		avant 74	entre 74 et 99	après 2000
Isolation + Nlle chaudière gaz	gaz/fioul	103,2 ktCO ₂		
Passage au chauffage urbain	gaz/fioul	61,6 ktCO ₂		
Passage à la pompe à chaleur	gaz/fioul	42,5 ktCO ₂		
Isolation	ch. urbain	16,1 ktCO ₂		
Isolation	électricité	13,3 ktCO ₂		
Total =		236,6 ktCO ₂		

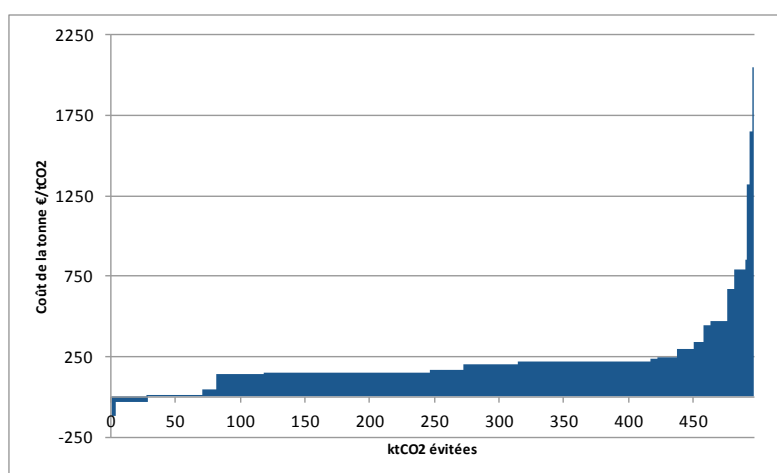
Le courbe de CMR (Figure 26) est construite en organisant l'ensemble des paquets de mesures identifiés pour les bâtiments individuels, collectifs et tertiaire, par ordre de coût unitaire croissant en associant à chacun la quantité de réduction correspondante¹⁹.

¹⁹ Par souci de lisibilité, les dernières options au-delà de 2000 €/tCO₂ qui génèrent des quantités de réduction très faibles n'ont pas été représentées sur la courbe.

La forme de la courbe est plus classique (forme concave) que celle obtenue pour le secteur des transports puisque les paquets de mesure sont indépendants les uns des autres et qu'il est donc possible de les ordonner selon un strict ordre de coûts croissants. La courbe fait par ailleurs apparaître plusieurs paliers qui regroupent des mesures dont les coûts unitaires sont relativement proches pour des objectifs successifs et croissants de réduction d'émissions :

- 0 - 70 kt CO₂ : mesures à coût négatif ou nul pour lesquelles les économies d'énergie justifient l'investissement de rénovation thermique ou de remplacement du système de chauffage sans prise en compte de la valeur carbone ; on retrouve ici les mesures visant le parc ancien de logements individuels d'avant 1974
- 70 – 270 kt CO₂ : mesures à coûts faibles (50 – 170 €/tCO₂) qui rassemblent pour l'essentiel des actions ciblées sur le parc ancien mais pour les logements collectifs cette fois ;
- 270 – 460 kt CO₂ ; mesures à coût élevé (200 – 450 €/tCO₂) ciblées sur les bâtiments ayant bénéficié d'une première réglementation thermique et chauffés au fioul ou au gaz ;
- 460 – 500 kt CO₂ : mesures à coût très élevé (supérieur à 450 €/tCO₂) qui rassemblent les actions concernant le parc de bâtiments récents (après 2000) chauffés au fioul ou au gaz, ou les logements de classe d'âge intermédiaire (1974-2000) chauffés à l'électricité ou raccordés au chauffage urbain.

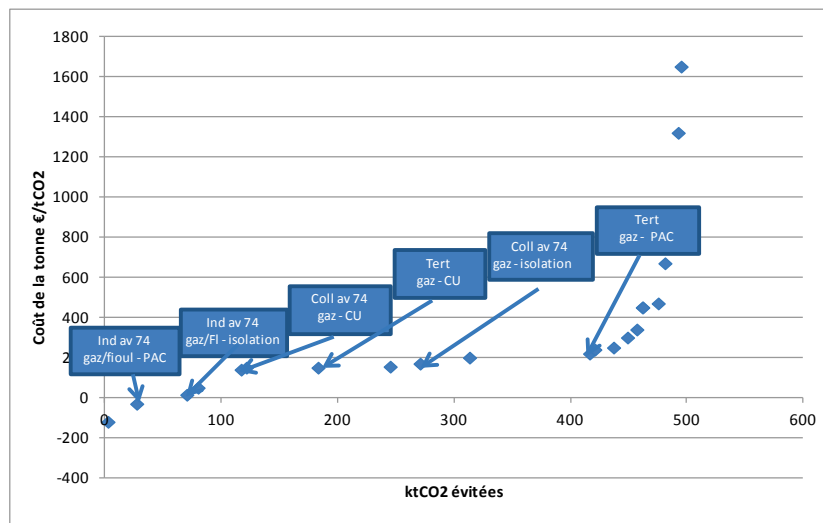
Figure 26: Courbe de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 4%)



La réalisation d'un objectif de réduction d'émissions de 450 kt par exemple, nécessiterait donc d'introduire une valeur carbone proche de 250 euros par tonne ; dépasser cet objectif imposerait de recourir à des valeurs carbone beaucoup plus élevées ; la pente de la courbe qui devient très forte après 450 kt indique des coûts très rapidement croissants et la limite des potentiels de réduction accessibles dans le secteur du bâtiment.

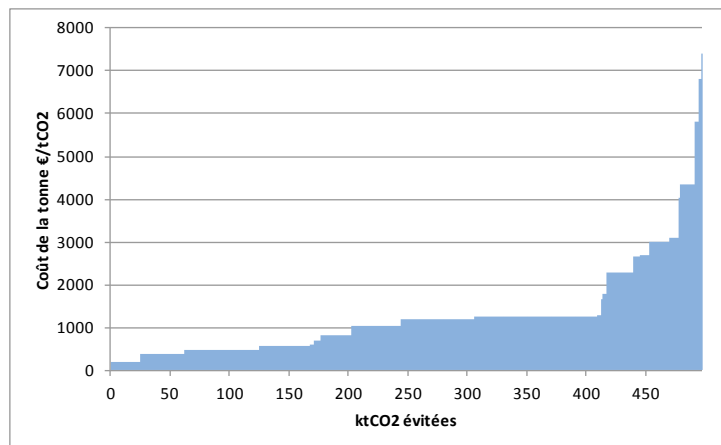
A titre d'illustration, la Figure 27 identifie certaines opérations-clé qui devraient être mises en œuvre pour atteindre un objectif proche de 450 kt de CO₂ ; des opérations dont le coût de réduction unitaire est inférieur à 250 €/tCO₂ et qui concernent essentiellement le parc ancien de bâtiments.

Figure 27: Courbe de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 4%)



La courbe de CMR pour le secteur du bâtiment a également été construite pour une valeur du taux d'actualisation de 20% plus proche des comportements d'investissement constatés pour les ménages. La courbe reproduite sur la Figure 28 présente un profil comparable à celui obtenu pour un taux d'actualisation de 4% mais celle-ci est logiquement décalée vers le haut. La rentabilité des opérations de rénovation thermique est en effet fortement dégradée lorsqu'on utilise un taux d'actualisation plus élevé. Une même opération, pour être rentable, impose donc des valeurs carbone beaucoup plus fortes : pour atteindre une quantité de réductions d'émissions de 400 kt, il faudrait avec un taux d'actualisation de 20% une valeur carbone proche de 1200 euros !

Figure 28: Courbe de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 20%)

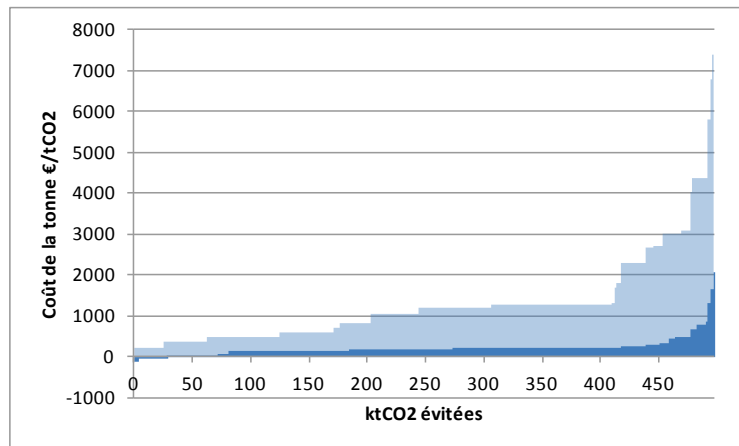


La superposition des deux courbes sur la Figure 29 montre la déformation de la CMR lorsque l'on modifie le taux d'actualisation. La courbe en bleu clair correspondrait aux comportements réels des ménages mal informés sur les options techniques, soumis à des contraintes de financement, ayant peu de visibilités sur le moyen/long terme, etc..., alors que celle en bleu sombre, correspondrait à des décisions d'investissements qui seraient prises par un décideur public informé, rationnel et sur un horizon de temps long.

La surface totale en dessous de chaque courbe représente le coût total permettant d'atteindre les objectifs de réduction pour des taux d'actualisation respectifs de 4 et 20%. L'écart entre les deux

courbes représente le différentiel des coûts des politiques entre ces deux taux. Il est de l'ordre de 180 M€ pour un objectif de réduction de 300 kt CO₂. Nous formulons l'hypothèse que ce coût pourrait traduire les contraintes à l'investissement pour les ménages et les coûts transactionnels induits, et donc, une estimation de l'effort public qu'il faudrait produire sous diverses formes (subventions directes ou prêts bonifiés ou actions d'information ou réglementation) pour ajuster les comportements d'investissement réels des ménages dans le secteur du bâtiment sur les comportements d'un décideur public informé et rationnel.

Figure 29: Courbes de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 4% et 20%)



3. Le secteur de la production / distribution de chaleur

L'objectif du travail réalisé sur les "réseaux énergétiques" vise à identifier les options de réduction d'émissions associées à la production d'énergie qui peuvent être mobilisées à l'échelle locale. L'analyse menée sur ce secteur s'est particulièrement focalisée sur la production et la distribution de chaleur centralisée puisque l'agglomération de Grenoble dispose sur ce plan d'un outil particulièrement performant (le réseau de Grenoble est le 2ème de France après celui de la CPCU à Paris), et dans une moindre mesure sur la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable de l'autre. Pour cela, il a fallu dans un premier temps identifier les potentiels d'énergie renouvelable et de récupération mobilisables puis les options techniques applicables au secteur de production de chaleur.

Potentiels en énergies renouvelables et récupération

L'évaluation des sources disponibles d'énergie renouvelable et de récupération vise à estimer les potentiels locaux mobilisables pour la production de chaleur ou d'électricité. L'évaluation est réalisée sur les données locales et intègre à ce stade uniquement les contraintes techniques de disponibilité et de valorisation, sans critères de rentabilité économique.

La première et principale ressource est la biomasse forestière. Le gisement de biomasse forestière mobilisable pour les usages bois énergie sur l'ensemble du département de l'Isère considéré comme le périmètre d'approvisionnement pertinent est estimé à environ 1350 GWh/an²⁰, à rapprocher de la production annuelle totale de chaleur du réseau de la CCIAG qui est de 900 GWh²¹. En intégrant des

²⁰ GWh PCI ou énergie primaire

²¹ Idem

critères d'accessibilité (plaine / montagne) on obtient une estimation de la ressource mobilisable tel qu'indiqué au Tableau 14.

Tableau 14: Estimation de la ressource biomasse forestière (échelle département)

Conditions de mobilisation de la ressource	Gisement (t/an)	Gisement (GWh/an)
Très favorable	140 000	378
Favorable	180 000	486
Peu favorable	160 000	432
Non exploitable	15 000	41

En complément de la biomasse forestière, d'autres ressources de biomasse sont mobilisables mais présentent des potentiels d'expansion limités. La ressource de biomasse de récupération (déchets industriels et déchets verts) actuellement utilisée est de 150 GWh/an²² pour un potentiel mobilisable à peine supérieur de 160 GWh/an²³. Quant aux déchets ménagers incinérables et boues de stations d'épuration, les potentiels mobilisables varient selon les hypothèses d'évolution de la population (et donc les scénarios structurants) entre 500 et 550 GWh/an en 2030 pour 450 GWh/an actuellement valorisés. A noter que deux hypothèses simplificatrices – et probablement conservatrices – ont été retenues pour l'estimation de ce potentiel : filières de traitement des déchets inchangées, quantité de déchets produite par habitant inchangée.

La ressource géothermique sur nappes superficielles peut être valorisée pour un couplage sur réseau d'eau chaude via une pompe à chaleur. Sur la commune de Grenoble, la plus favorable et la seule commune pour laquelle les données sont disponibles, le gisement en géothermie mobilisable serait de 480 000 MWh/an pour une cinquantaine d'installations. L'énergie des eaux usées pourrait également faire l'objet d'une exploitation par l'intermédiaire de pompes à chaleur, pour un total récupérable estimé à 40-50 GWh/an injectables sur le réseau.

Une analyse technico économique rapide a montré le faible intérêt de la valorisation de l'éolien dans le département de l'Isère. En revanche, la ressource hydroélectrique présente un potentiel très important y compris sur le périmètre de la METRO mais déjà en partie valorisé (production hydroélectrique : 425 GWh). La production peut toutefois être étendue en optimisant les installations existantes, en créant de nouvelles installations ou en accroissant la puissance sur des ouvrages déjà équipés. L'augmentation de la production hydroélectrique est estimée à 130 GWh selon le Schéma Climat Air – Energie de la Région Rhône Alpes.

Enfin, les potentiels solaires thermique et photovoltaïque ont été estimés grâce à un système d'information géographique permettant de localiser et de quantifier les surfaces de toitures disponibles pour l'installation de capteurs. Pour le solaire thermique destiné à la production d'eau chaude sanitaire, le gisement a été estimé à 70 GWh-th/an et à 295 GWh-th/an pour la production d'électricité photovoltaïque.

²² Idem

²³ Idem

Tableau 15: Energies renouvelables et de récupération : gisement exploité et potentiels mobilisables

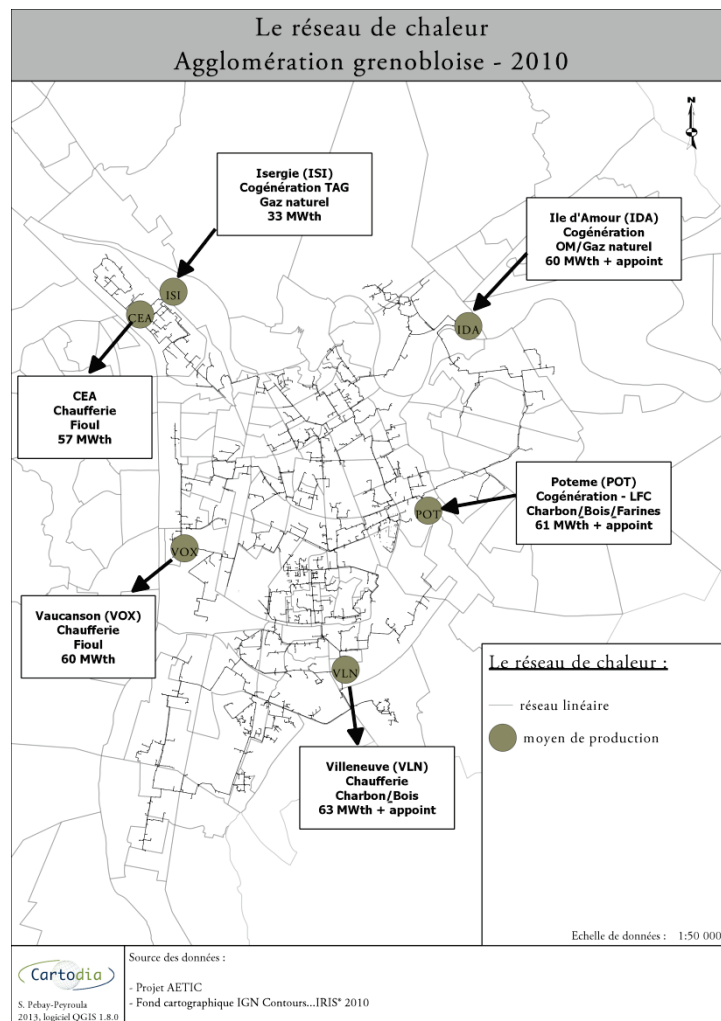
	Gisement exploité	Gisement mobilisable	
Biomasse forestière (bois-énergie)	10 000 t/an 30 000 MWh _{PCI} (périmètre de la Métro)	500 000 t/an 1 350 000 MWh _{PCI} (périmètre département)	/
Biomasse de récupération	48 000 t/an 150 000 MWh _{PCI}	50 000 t/an 155 000 MWh _{PCI}	0,02
Ordures Ménagères et Incinérables	160 000 t/an 410 000 MWh _{PCI}	190 000 à 205 000 t/an 500 000 à 550 000 MWh _{PCI}	+19 à +28%
Géothermie sur réseau de chaleur	0 MWh _{th} /an	480 000 MWh _{th} /an	/
Valorisation thermique eaux usées	0 MWh _{th} /an	40 000 à 50 000 MWh _{th} /an	/
Solaire thermique (ECS - Bâtiment)	2 455 MWh _{th} /an	70 000 MWh _{th} /an	x28
Solaire photovoltaïque	700 MWe/an	295 000 MWh _e /an	x600
Hydroélectricité	425 000 MWh _e /an	550 000 MWh _e /an	0,3
Eolien	0 MWe /an	0 MWh _e /an	=

Identification des options de réduction d'émissions dans le secteur de la chaleur

Le réseau de chaleur de l'agglomération Grenobloise, exploité par la CCIAG (Compagnie de Chauffage de l'Agglomération Grenobloise) dessert environ 90 000 équivalents-logements répartis sur sept communes de l'agglomération grenobloise (Echirolle, Eybens, Gières, Grenoble, La Tronche, Pont de Claix, Saint Martin d'Herès). Ce réseau est alimenté par quatre principales unités de production :

- une usine d'incinération d'ordures ménagères (Ile d'Amour - IDA) fonctionnant en cogénération et produisant 60 MW_{th} de chaleur sur le réseau et 6 MWe d'électricité. La quantité annuelle de déchets ménagers incinérés était en 2009-2010 d'environ 170 000 tonnes.
- une turbine à gaz en cogénération (Isergie – ISI, 28 MWe/33MW_{th}) fonctionnant uniquement en mode cogénération (ie en période de demande de chaleur).
- une centrale thermique en cogénération alimentée par du charbon et de la biomasse (La Poterne/POT, 12 MWe/16 MW_{th}) fonctionnant également uniquement en période de demande de chaleur.
- une chaudière classique charbon-biomasse (Villeneuve/VLN, 63 MW_{th}).
- et divers dispositifs de production de chaleur utilisant des combustibles gaz et fioul et mobilisés pour l'approvisionnement en appoints/secours (CEA, VOX, ...).

Figure 30: Plan du réseau de chaleur et des moyens de production de la CCIAG



Pour l'année 2010, le fonctionnement du réseau a fait l'objet d'une simulation qui a permis de caler le modèle qui sera ensuite utilisé pour simuler la production de chaleur en 2030. Les résultats obtenus pour 2010 sont très proches (écart de 5-10%) des valeurs réelles observées. Les ventes annuelles de chaleur aux clients résidentiels, tertiaires et industriels s'élevaient à 781 000 MWh et la production sur le réseau à 907 000 MWh (les pertes thermiques de distribution représentant environ 14% de la production). Les moyens de production de chaleur simulés par le modèle conduisent à un mix de production avec 35% de valorisation énergétique des déchets, 23% de charbon, 20% de biomasse, 12% de cogénération gaz et 10% de combustibles de pointe (gaz et fioul), soit une proportion d'énergies renouvelables et de récupération de 55%.

Les options techniques envisagées concernent essentiellement l'installation de nouvelles unités et/ou le remplacement d'unités existantes par des moyens de production utilisant des sources d'énergie moins émettrices de GES. Les possibilités d'amélioration ou d'optimisation des moyens de production existants n'ont pas été considérées malgré leur intérêt économique. Mais le manque d'information sur les conditions de fonctionnement de ces unités et la faiblesse des enjeux quantitatifs que représentent ces options ont conduit à les abandonner.

Pour la production de chaleur, les principales options étudiées sont les suivantes :

- chaudière biomasse alimentée en biomasse forestière.
- cogénération biomasse (turbine à vapeur), alimentée en biomasse forestière.
- chaudière gaz naturel.
- pompe à chaleur sur collecteur d'eaux usées, alimentant une boucle basse température ; la boucle BT remplacerait le réseau existant sur un IRIS déjà desservi au nord-est de Grenoble, à proximité d'un collecteur d'eau usée. La pompe à chaleur couvrirait 50% des besoins de chaleur des bâtiments de l'IRIS raccordés à cette boucle, le complément étant fourni par le réseau principal.
- pompe à chaleur géothermique sur boucle basse température. Au contraire de la pompe à chaleur sur eaux usées, plusieurs IRIS répartis sur toute l'agglomération grenobloise peuvent être équipés en pompe à chaleur géothermique sur boucle basse température

Le stockage d'énergie thermique (par chaleur latente) qui permettrait notamment de limiter le recours aux moyens de production de pointe (fioul/gaz) n'a pas été étudié de façon approfondie car les caractéristiques techniques du réseau de distribution (eau surchauffée) ne sont pas appropriées à ce mode de stockage.

Le périmètre de distribution de la chaleur en réseau est par ailleurs supposé évoluer en lien avec les résultats obtenus sur la simulation MOBAT (cf supra). Lorsqu'une valeur donnée du carbone rend l'option de raccordement au réseau rentable, de nouveaux bâtiments sont raccordés et la demande de chaleur adressée au réseau évolue. Toutefois, l'option de raccordement au réseau n'est pas disponible pour l'ensemble des bâtiments, seules les options suivantes ont été considérées :

- raccordement de nouveaux clients sur le réseau existant dans des IRIS déjà desservis (densification du réseau) ;
- raccordement de nouveaux clients sur le réseau existant dans des IRIS limitrophes des IRIS déjà desservis (extension du réseau) ;
- et raccordement de nouveaux clients sur de nouveaux réseaux autonomes (création de réseau) ;

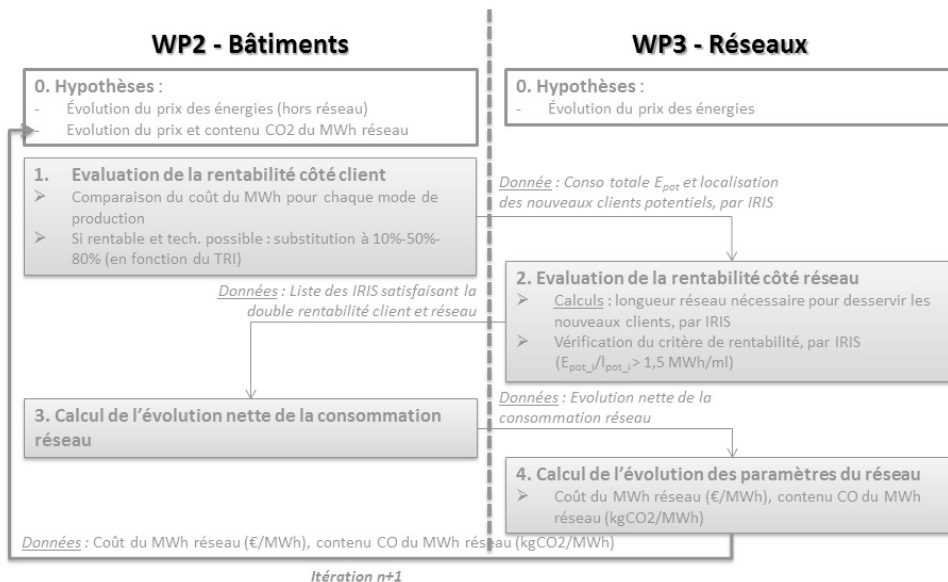
Pour tester la faisabilité des extensions de réseaux ou de la création de petits réseaux autonomes, des critères de densité de demande de chaleur ont été introduits qui ont permis de vérifier que la demande potentiellement raccordable était compatible avec une desserte en réseau. Ce critère a été appliqué aux communes dans lesquelles la proportion de logements collectifs pouvait a priori justifier la création d'un réseau de chaleur mais aucune commune ou groupe d'IRIS n'a satisfait à ce critère.

La demande de chaleur adressée au réseau dépend donc de l'extension (ou de la concentration) du périmètre de distribution de la chaleur mais elle évolue également en lien avec les opérations de rénovation thermique simulées par MOBAT. L'interaction entre le secteur du bâtiment et celui de la production / distribution de chaleur a nécessité la mise en place d'une interface de bouclage spécifique pour d'une part, informer le modèle de simulation de réseau des évolutions de la demande de chaleur après rénovation et/ou substitution et, d'autre part, estimer l'impact sur le coût de la chaleur distribuée d'une diminution des quantités livrées.

La procédure utilisée est décrite sur la Figure 31. Elle consiste à estimer les substitutions possibles des énergies de chauffage, du fioul ou du gaz, vers le réseau de chaleur et la demande résultante. Le modèle de réseau calcule les extensions de réseaux nécessaires pour satisfaire la demande additionnelle en retenant celles qui satisfont au critère de rentabilité. Sur cette base, le modèle simule le fonctionnement du réseau et établit de nouveaux paramètres de fonctionnement avec un nouveau prix de la chaleur. Le nouveau prix est intégré dans le module bâtiment et comparé au prix initial ; une nouvelle itération est réalisée lorsque le prix s'écarte de façon significative du prix initial.

Le prix de la chaleur distribuée intègre ainsi les conséquences des variations de la demande de chaleur et notamment d'une diminution éventuelle de la demande résultant des actions de rénovation thermique (moindre amortissement des coûts fixes de réseau mais aussi diminution du coût marginal de production de la chaleur en raison d'un recours limité aux groupes utilisés en pointe).

Figure 31: Interactions demande et offre de chaleur



Elaboration de la courbe de CMR (scénario de concentration urbaine)

La construction des courbes de CMR pour le secteur de la production / distribution de la chaleur s'effectue à partir d'une situation de référence décrite ici pour le scénario de concentration urbaine. La situation de référence constitue une projection à 2030 du fonctionnement du réseau sans prise en compte de la contrainte environnementale et donc sans mise en œuvre d'aucune action supplémentaire de réduction des émissions de GES, autre que celles déjà en place en 2010. Ce scénario intègre les évolutions suivantes :

- évolution des prix des énergies (cf supra)
- évolution de la demande de chaleur adressée au réseau tenant compte du raccordement de bâtiments neufs (dans les IRIS déjà desservis par le réseau) avec l'hypothèse de parts de marché inchangées par rapport à la situation initiale (augmentation de 7% pour le scénario concentration urbaine)
- accroissement de la disponibilité des ressources (déchets ménagers et biomasse de récupération)

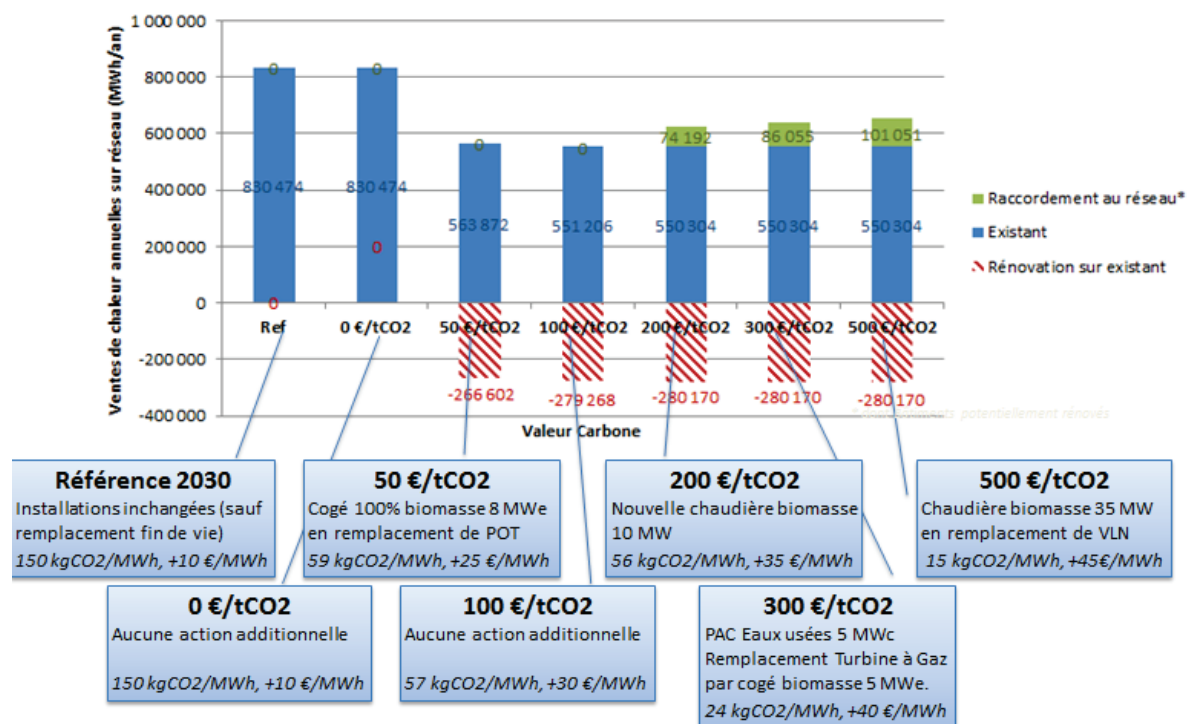
- remplacement à l'identique des technologies si nécessaire (fin de vie des installations existantes par exemple)

Sous ces hypothèses, la demande de chaleur adressée au réseau augmente de 7% par rapport à 2010 (raccordement de nouveaux bâtiments) et les émissions de CO₂ de 2% (amélioration du facteur de charge des moyens de production moins émetteurs). Le prix de la chaleur distribuée augmente également (de 15%) en raison de l'accroissement des prix des combustibles, augmentation partiellement compensée par une contribution accrue de l'UIOM et par l'accroissement des ventes de chaleur.

La construction de la courbe de coût marginal de réduction d'émissions pour le secteur de la chaleur s'effectue ensuite en calculant la demande de chaleur résultant de l'introduction d'une valeur carbone, dans un premier temps, puis en testant ensuite différentes options techniques visant à réduire les émissions à l'échelle de la production.

L'évolution de la demande de chaleur adressée au réseau (2030 – scénario Concentration Urbaine) est rappelée sur la Figure 32 (pour un taux d'actualisation de 4%). La consommation de chaleur diminue avec l'introduction d'une valeur carbone de 50€ qui induit des opérations de rénovation thermique de bâtiments desservis par le réseau. Lorsque l'on atteint une valeur carbone de 200 €/t, la diminution de la demande résultant de l'accroissement de l'efficacité énergétique est partiellement compensée par une augmentation de la demande induite par les nouveaux raccordements.

Figure 32: Evolution de la demande de chaleur réseau et évolution du mix de production de chaleur pour différentes valeur carbone (scénario Concentration Urbaine – taux actualisation : 4%)



Pour les 6 couples de valeur carbone et demande de chaleur ainsi établis, le modèle de réseau teste ensuite les options technologiques et mix de production de chaleur qui minimisent le coût global d'approvisionnement.

Pour une valeur carbone de 0 €/tCO₂, la consommation réseau reste inchangée par rapport à la référence. Aucune action élémentaire de réduction des émissions de CO₂ sur le réseau n'est rentable pour cette valeur carbone. Les caractéristiques du mégawatheure réseau (prix, contenu CO₂) sont donc en tous points identiques à celles du scénario de référence à 2030.

A 50 €/tCO₂, l'installation d'une cogénération 100% biomasse de 8 MW_e, en remplacement de la cogénération charbon biomasse existante (POT) apparaît rentable. Cette nouvelle cogénération est à la fois mieux dimensionnée, pour s'adapter à la diminution de consommation réseau, et plus performante du point de vue énergétique et des émissions de CO₂, comparativement à l'ancienne cogénération qui pourra être fermée (40 ans à l'horizon 2030). L'accroissement de la production de chaleur issue de la biomasse (22% soit 73 000 t/an) et l'augmentation de la contribution de l'incinérateur (54%) se traduisent par une amélioration du contenu CO₂ du mégawatheure qui passe à 59 kgCO₂/MWh. Le prix de la chaleur augmente d'environ 15 €/MWh par rapport à la référence, sous le double effet de la diminution des ventes de chaleur et de l'augmentation de la valeur carbone.

A 100 €/t, aucune nouvelle action n'est rentable. En revanche, avec une valeur carbone de 200 €/t, il devient possible d'installer une nouvelle chaudière biomasse qui permet d'absorber une partie de l'augmentation de demande et de remplacer des appoints fioul par une chaudière au gaz naturel de 4 MW_{th}. L'effet de l'augmentation de la consommation réseau, qui met généralement à contribution les moyens de production de pointe, est ainsi contrebalancé par l'installation de ces moyens de production peu ou non-carbonés. La proportion d'énergie renouvelable et le contenu CO₂ du mégawatheure sont inchangés mais le prix de la chaleur augmente, d'environ 5 €/MWh par rapport à la valeur carbone précédente sous l'effet conjoint de l'augmentation des ventes de chaleur et de l'augmentation de la valeur carbone.

A 300 €/tCO₂, les ventes de chaleur progressent légèrement sous l'effet de nouveaux raccordements au réseau. Avec cette valeur carbone, le remplacement de la turbine à gaz par une cogénération biomasse devient rentable de même que l'installation d'une pompe à chaleur (PAC) sur collecteur d'eaux usées, alimentant une boucle basse température. Il en résulte une réduction du contenu CO₂ du mégawattheure à 25 kgCO₂/MWh. La proportion d'énergie renouvelable dans le mix de production atteint alors 88% et la quantité de biomasse consommée annuellement est égale à 140 000 t/an.

Avec une valeur carbone élevée de 500 €/tCO₂, les ventes de chaleur progressent encore. La chaudière charbon-biomasse (VLN) est remplacée par une chaudière 100% biomasse de 35 MW_{th}. Ainsi, l'ensemble des moyens de production hors pointe utilise un combustible renouvelable ou de récupération (déchets ménagers). Par ailleurs, l'installation d'une pompe à chaleur géothermique alimentant une boucle « basse température » (65°C/40°C)²⁴ est également activée sur une zone au sud-ouest de l'agglomération grenobloise. Au final, le contenu CO₂ du MWh est réduit « à l'extrême »

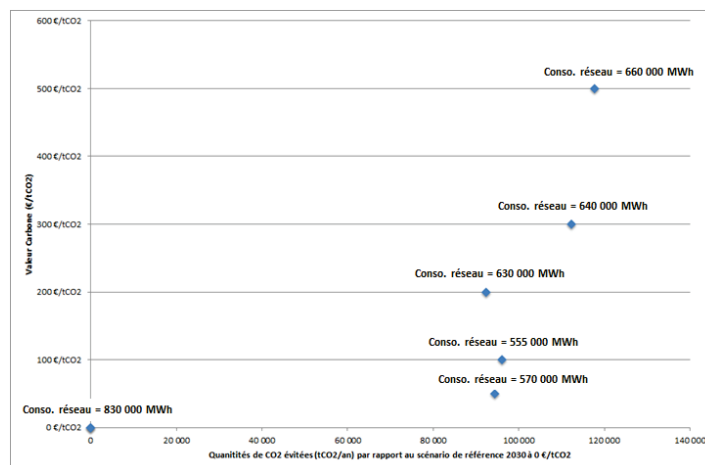
²⁴ Se reporter à la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable..Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour plus de détails

(15 kgCO₂/MWh) pour un taux de pénétration des énergies renouvelables qui atteint 90% du mix de production. Le prix de la chaleur augmente d'environ 5 €/MWh par rapport à la valeur carbone précédente.

Les éléments décrits ci-dessus constituent les briques permettant d'élaborer la courbe de CMR pour le scénario de concentration urbaine. Le point origine correspond à la situation de référence puis la courbe est construite en figurant en abscisse la quantité cumulée de réduction d'émissions obtenue par les actions successives décrites ci-dessus et en ordonnées les valeurs carbone correspondantes. Comme pour la courbe de CMR construite sur le secteur des transports, et à la différence de celle du secteur des bâtiments, les points de la courbe représentent ici des paquets d'options qui regroupent sous un même point plusieurs actions unitaires.

La courbe obtenue est représentée sur la Figure 33. On constate que le premier point de la courbe correspondant à la valeur de 50 €/t induit une quantité de réductions d'émissions très supérieure à celles qui sont obtenues ensuite pour des valeurs carbone plus élevées. La raison est que chaque point de la courbe intègre des options de transformation du mix de production (augmentation de la charge de l'incinérateur et installation d'une cogénération biomasse) ainsi qu'une évolution de la demande de chaleur adressée au réseau. L'impact de la diminution de la demande induite par la valeur carbone est particulièrement important à ce stade car le contenu CO₂ du mégawatheure est encore très proche de la valeur de référence. Pour des valeurs carbone plus élevées, le contenu CO₂ est sensiblement réduit par la transformation du mix de production et les nouveaux raccordements viennent en partie compenser la diminution de la demande.

Figure 33 : Courbe de CMR pour le secteur de la chaleur (scénario Concentration Urbaine – ta=4%)



Note : la consommation de chaleur évolue pour chaque valeur carbone

La courbe de CMR pour le secteur de la chaleur présente par ailleurs une particularité que n'avaient pas les courbes obtenues pour les secteurs des transports ou des bâtiments : pour certaines valeurs du carbone, la quantité additionnelle d'émissions évitées est négative, c'est-à-dire que lorsque la valeur carbone atteint puis dépasse 100 €/t (et jusqu'à 200 €/t) les émissions cessent de diminuer puis augmentent à nouveau. Le paradoxe n'est qu'apparent ; il traduit le fait que l'on mesure ici l'ensemble des émissions liées à la production de chaleur pour le réseau or, au-delà de 100 €/t, de nouveaux raccordements au réseau s'opèrent et la demande augmente. Cette augmentation de la demande se produit alors qu'aucune autre action au niveau du mix de production ne vient limiter les

émissions unitaires : l'augmentation de la production de chaleur destinée à satisfaire la demande se traduit donc par une augmentation des émissions associées. A partir de 200 €/t, la demande de chaleur augmente peu et de nouvelles actions sur le mix de production (nouvelle chaudière biomasse) permettent aux émissions de continuer à décroître.

Si on analyse le seul secteur de la production de chaleur, la décroissance des émissions s'inverse donc pour des valeurs carbone situées entre 100 et 200 €/t. Mais le résultat est différent si on considère un périmètre étendu qui intègre la demande et la production de chaleur. L'augmentation de la demande de chaleur correspond à des raccordements au réseau qui viennent en substitution d'une demande de chaleur auparavant satisfaite par le fioul ou le gaz. Le moindre contenu CO₂ de la chaleur réseau se traduit donc par une diminution globale des émissions sur l'ensemble du périmètre intégrant les bâtiments (la demande) et les unités de production de chaleur.

Influence du taux d'actualisation / des scénarios sur la courbe de CMR

L'évolution de la demande et du mix de production de chaleur décrite sur la Figure 32 est le résultat de conditions économiques particulières qui correspondent à des comportements d'investisseurs publics informés, rationnels, sans contrainte majeure de financement, peu averses au risque, etc..., ce que nous avons traduit par l'application d'un taux d'actualisation faible de 4%. Ce taux a été retenu pour permettre l'inter-comparaison entre les résultats des différents secteurs obtenus avec un taux d'actualisation identique. Si l'on souhaite s'approcher de la réalité des comportements d'investissement des acteurs industriels, pour ce qui concerne la production de chaleur, et des ménages pour ce qui concerne le bâtiment et la demande de chaleur, il faut sensiblement accroître la valeur du taux d'actualisation. On utilisera un taux de 12% pour les acteurs industriels (et un taux de 20% pour les particuliers).

La Figure 34 montre l'impact d'une modification du taux d'actualisation sur la demande de chaleur adressée au réseau. La différence avec la courbe de demande représentée sur la Figure 32 est l'absence ou la moindre amplitude de la baisse de consommation avec l'augmentation de la valeur carbone. L'introduction d'un taux d'actualisation reflétant les comportements d'investissement réels des ménages dégrade nettement la rentabilité des options de rénovation thermique et impose des valeurs carbone beaucoup plus élevées. Les rénovations thermiques interviennent alors plus "tardivement" (à partir de 300 €/t) et avec une amplitude moindre, de même que les raccordements au réseau de logements utilisant auparavant des énergies fossiles.

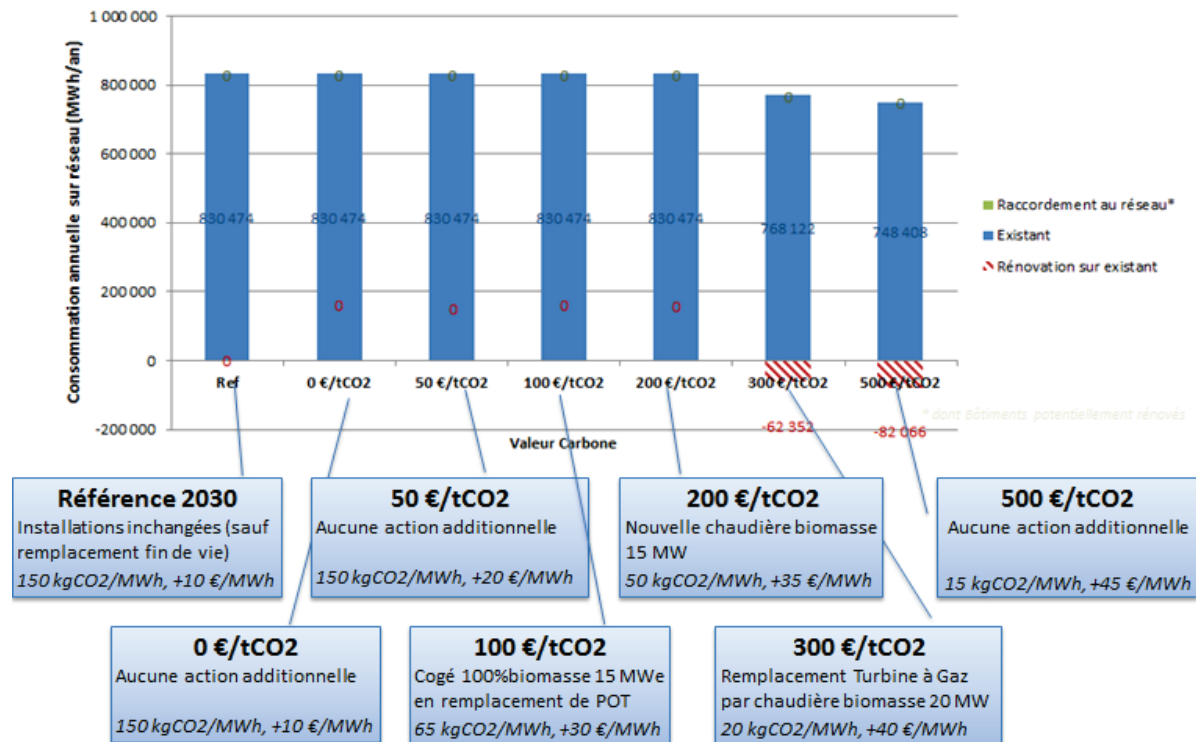
En ce qui concerne l'évolution du mix de production de chaleur, les options qui apparaissent avec un taux d'actualisation de 12% sont de même nature que celles retenues avec un taux de 4% (augmentation de la part de la biomasse dans les combustibles, remplacement des moyens de production les plus carbonés, etc.) mais :

- le dimensionnement des nouveaux moyens de production n'est pas le même que dans l'hypothèse d'un taux d'actualisation de 4% (en raison du nouveau profil de demande)
- les valeurs carbonées à prendre en compte pour justifier le choix de moyens de production moins carbonés sont plus élevées.

Ainsi, une valeur carbone de 100 €/tCO₂ est nécessaire pour justifier l'installation d'une cogénération biomasse (contre 50 €/t dans le scénario 4%) d'une puissance de 15 MW (contre 8 MW dans le

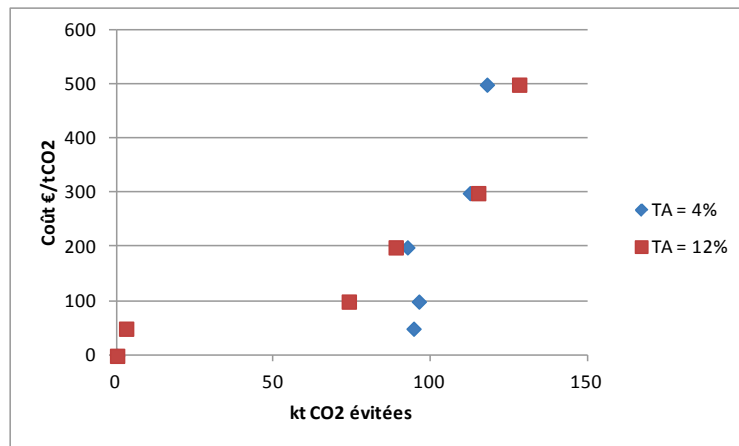
scénario 4%). Avec cette valeur de 100 €/tCO₂, la part des combustibles renouvelables dans la production de chaleur atteint 72% comme dans le scénario 4%, mais elle représente en valeur absolue 600 GWh contre seulement 400 GWh pour le scénario 4%.

Figure 34: Evolution de la demande de chaleur réseau et évolution du mix de production de chaleur pour différentes valeur carbone (scénario Concentration Urbaine) – TA = 12%



La juxtaposition des deux courbes (Figure 35) produit les résultats anticipés (cf. partie méthodologie) avec une CMR 12% globalement positionnée au dessus de la CMR 4% ce qui signifie que le coût de réalisation d'un objectif de réduction des émissions de 100 ktCO₂, par exemple, serait sensiblement plus élevé si on tient compte des comportements d'investissements réels des acteurs industriels. On observe toutefois que les courbes se croisent pour des valeurs de 300 €/t indiquant que le coût marginal de limitation des émissions devient alors plus faible pour un taux d'actualisation de 12%. Une raison est que les ventes de chaleur diminuent alors plus rapidement avec le ta de 12% (l'essentiel des rénovations et substitution a déjà été effectué pour des valeurs carbone plus faibles avec un ta de 4%), ce qui se traduit par des émissions évitées à des coûts en proportion plus faibles que pour ta = 4%. L'autre raison est tout simplement que les mêmes actions appliquées à des consommations réseau plus élevées produisent des quantités d'émissions évitées plus importantes.

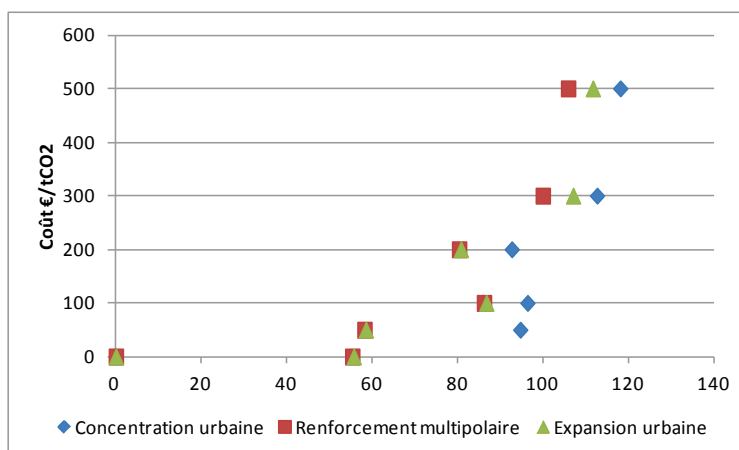
Figure 35: Courbe de CMR pour le secteur de la chaleur (scénario Concentration Urbaine) – TA = 4% / TA = 12%



La juxtaposition des courbes de CMR obtenues pour les 3 scénarios structurants avec un taux d'actualisation de 4% (Figure 36) montre que les écarts entre les 3 scénarios sont finalement assez peu significatifs. On observe néanmoins que la courbe correspondant au scénario de concentration urbaine est située en dessous des deux autres. Par ailleurs, le coût moyen de réduction obtenu pour le scénario de concentration urbaine est de 106 €/tCO₂, légèrement inférieur à ceux des scénarios de renforcement multipolaire ou d'expansion urbaine avec respectivement, 121 €/tCO₂ et 127 €/tCO₂.

Rappelons que par construction, les écarts entre scénarios pour ce qui concerne la chaleur sont très faibles puisque les différences portent uniquement sur la localisation des bâtiments neufs (hypothèse d'un taux de raccordement identique des bâtiments neufs au réseau selon les scénarios pour les zones déjà desservies et en l'absence de différenciation dans le raccordement de nouveaux IRIS). Sous ces hypothèses volontairement simplificatrices, l'écart entre scénarios pour la chaleur porte sur la demande de chaleur, plus élevée dans le scénario de concentration urbaine, le remplacement des équipements existants intervient alors plus rapidement et en bénéficiant d'effets d'échelle plus importants. Toutefois il paraît difficile d'affirmer, compte tenu de la faiblesse des écarts observés, que le scénario de concentration urbaine serait plus favorable à la mise en œuvre d'une politique climatique pour le secteur de la chaleur. Cette conclusion nécessiterait une analyse spécifique plus approfondie.

Figure 36: Courbes de CMR pour les 3 scénarios (taux d'actualisation = 4%)



Les courbes CMR présentées ci-dessus ne reprennent que les résultats relatifs à la chaleur (production et distribution). Elles doivent être complétées par les options de production locale d'électricité identifiées sur le périmètre de l'agglomération de Grenoble. Ces options ne présentent pas d'interaction avec le secteur de la chaleur et peuvent donc être agrégées à la courbe CMR de la chaleur sans introduire de perturbations.

Deux potentiels techniques qui présentent des enjeux significatifs à l'échelle de l'agglomération (cf supra) sont intégrés à la courbe CMR de production locale d'énergie²⁵ :

- la production photovoltaïque intégrée en toiture : le potentiel total estimé à partir des surfaces de toitures disponibles et déduction faites des contraintes techniques (et surfaces réservées pour le solaire thermique BT), à 300 GWh dont 50% pourraient être exploitables à l'horizon 2030
- la production micro-hydraulique : le potentiel supplémentaire exploitable est estimé à 550 GWh.

Pour être intégrées dans les courbes de CMR, les données de potentiels ont été complétées par des évaluations des émissions de CO₂ que leur exploitation permettrait d'éviter. Les quantités évitées sont estimées en considérant que les moyens de productions locaux se substituent à des soutirages sur le réseau national. Le calcul conduit à un coût de la tonne évitée voisin de 0€/t pour l'hydraulique et situé entre 1000 et 2000 €/t pour le photovoltaïque en tenant compte d'un surcoût lié à l'intégration de sources intermittentes (pour le PV essentiellement) imposant soit de comptabiliser des dispositifs de stockage locaux soit de prévoir des capacités de production de secours sur le réseau global. Les potentiels correspondant sont de 11 kt CO₂ pour l'hydraulique et de 12 kt CO₂ pour le photovoltaïque, conduisant à un potentiel total de réduction d'émissions pour la chaleur et la production locale d'électricité à partir de sources renouvelables de 141 kt CO₂.

²⁵ Les hypothèses utilisées ici sont importantes : l'électricité d'origine renouvelable efface de la production centralisée à 80 kgCO₂/MWh et 90 €/MWh.

VI. Approche globale : quels enseignements ?

1. Intégration des résultats sectoriels

Outre l'identification et la quantification des potentiels de réduction d'émissions de CO₂ à l'échelle locale dans les secteurs-clés que constituent les bâtiments, les transports et la production locale d'énergie, le projet AETIC propose une stratégie coût-efficace de réduction d'émissions qui s'appuie sur une inter-comparaison des potentiels sectoriels. La définition de la stratégie coût-efficace passe par l'élaboration d'une courbe de CMR globale qui intègre les potentiels de réduction sectoriels.

Pour construire une courbe de CMR globale à partir des courbes sectorielles, plusieurs conditions doivent être respectées :

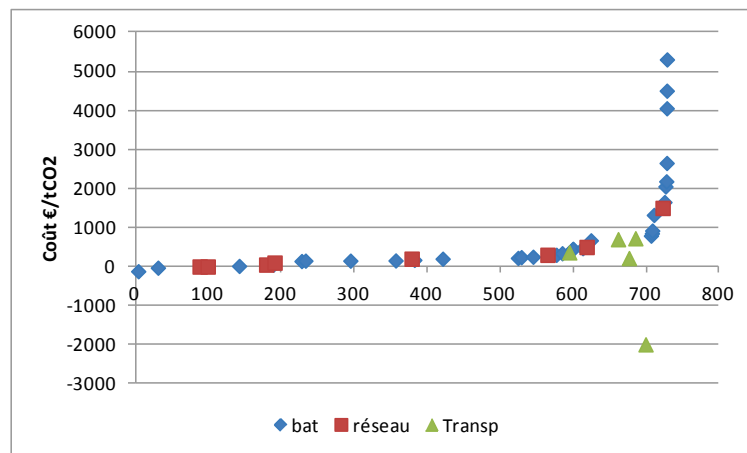
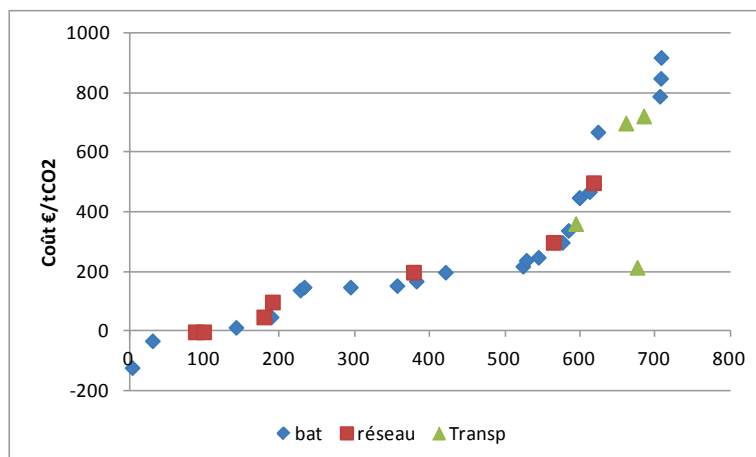
- les paramètres économiques utilisés pour le calcul des CMR sectorielles sont identiques ; raison pour laquelle un taux d'actualisation identique de 4% a été retenu dans chacun des secteurs ;
- les options techniques sectorielles considérées sont largement indépendantes les unes des autres ; on peut ainsi réaliser d'abord des actions de réhabilitation thermique des logements sans que cela n'interfère sur le coût des actions dans le secteur des transports
- lorsque des interdépendances existent, elles ont été traitées en amont de façon à ce que le rapprochement des options sectorielles ne crée pas d'incohérences ou de double compte ; ainsi, la création d'une interface de bouclage demande-offre entre les secteurs des bâtiments et de la chaleur permet de tenir compte des interactions entre les deux secteurs et en particulier de rendre compatibles les options associées à la production et à la consommation de chaleur.

Les courbes sont construites en intégrant les options de réduction d'émissions sectorielles par rapport à la situation de référence de 2030. Sauf pour ce qui concerne le secteur des transports, toutes les options sectorielles identifiées, y compris celles à coûts très élevés dans le secteur du bâtiment, sont organisées par ordre de coût croissant (Figure 37).

Comme indiqué dans la partie relative à la construction de la courbe sectorielle pour les transports, les options de réduction ont conservé une forte interdépendance malgré le regroupement en paquets d'actions. Chaque option identifiée dans le secteur transport présente des caractéristiques (quantités, coûts) qui sont fortement dépendantes des actions engagées au préalable. L'ordre de mise en œuvre est donc déterminant et notre choix a consisté à adopter une cohérence programmatique même lorsque celle-ci ne coïncide pas avec un strict ordre de mérite²⁶. Par ailleurs, en raison des incertitudes comportementales relatives à l'option covoiturage, celle-ci a été placée en dernière position des options transport, pour mettre en évidence l'enjeu quantitatif de l'option sans pour autant lui attribuer un positionnement trop favorable dans l'ordre de priorité.

²⁶ Dans le scénario de concentration urbaine, la première option transport correspond au bus à haut niveau de service, puis les autres options sont réalisées dans l'ordre du programme, c'est-à-dire, la mise en place du péage puis l'extension du tram, etc.

Figure 37: Courbes de CMR globale en 2030 (Scénario Concentration Urbaine - taux d'actualisation = 4%)

Figure 38: Courbes de CMR globale en 2030 (Scénario CU - ta = 4% - suppression options > 1000 €/tCO2²⁷)

Plus encore que sur les courbes sectorielles on observe que la courbe globale présente deux seuils avec rupture de pente, le premier au-delà de 500 kt (à 200€/tCO2) et le second après 700 kt de CO2 (à 600€/tCO2). Les options identifiées dans les trois secteurs considérés permettent d'atteindre cette quantité de réductions d'émissions. Au-delà, les options additionnelles induisent des quantités de réduction faibles ou très faibles pour des coûts rapidement croissants. On dépasse alors les 1000 €/tCO2 pour atteindre jusqu'à 4000 €/tCO2, ce qui correspond à des valeurs carbone très au dessus des valeurs généralement considérées même pour des objectifs très ambitieux comme le facteur 4.

Rappelons que les émissions totales pour les trois secteurs considérés sur le périmètre de l'agglomération sont estimées entre 1290 et 1370 ktCO2 en 2030 selon les scénarios et à 1340 kt en 2010. Les potentiels identifiés représenteraient donc une réduction d'émissions de l'ordre de 50% des émissions actuelles.

²⁷ L'option de covoiturage n'apparaît plus sur ce graphique parce que l'échelle a été volontairement limitée à (-200 €/tCO2 / 1000 €/tCO2) pour des raisons de visibilité mais sa contribution est bien prise en compte.

La rupture de pente après 700 kt de CO₂ peut signifier que les potentiels technico-économiques mobilisables à l'échelle de l'agglomération de Grenoble ne s'étendent effectivement pas au-delà. Plus probablement, elle traduit un défaut d'identification d'options mobilisables sur une échelle de coûts allant de 1000 à 2000 €/tCO₂, des options que nous n'avons pas considérées a priori. La démarche d'identification des options de réduction est, en effet, radicalement différente entre le secteur du bâtiment, d'un côté, et les secteurs des transports et de la chaleur de l'autre. Pour ces derniers, les options identifiées renvoient à une logique d'expert (identification des seules options les plus intéressantes) alors que l'approche utilisée pour les bâtiments présente un caractère systématique (des options techniques multiples appliquées à l'ensemble d'un parc diversifié) qui conduit nécessairement à identifier des options aux coûts élevés. Dans le premier cas (transport / chaleur), les options dépassant 1000 €/tCO₂ n'ont pas été réellement explorées. Les options dépassant ce niveau de coût qui figurent sur les courbes résultent donc de la démarche adoptée pour le secteur du bâtiment.

Lorsqu'on élimine les options dont les coûts marginaux dépassent 1000 €/t (la rénovation des logements construits après 2000 et ceux plus récents utilisant des vecteurs peu carbonés), la forme de la courbe ne présente plus de rupture de pente aussi marquée (Figure 38). Les options de réduction présentent une progression des coûts qui permet de fait de distinguer deux grandes catégories d'options :

- le premier potentiel représente près de 500 kt de CO₂ et les coûts s'étagent jusqu'à 200€/tCO₂ (dont une partie à coût négatif) qui rassemble les options de réhabilitation thermique dans le parc ancien²⁸ (avant 1974), les premières options de transformation du mix de production de chaleur (cogénération biomasse) et la production hydraulique
- puis un second potentiel de 200 kt dont les coûts s'étagent entre 200 et 900 kt CO₂ dans lequel se situent les autres options de transformation du mix de production de chaleur avec la géothermie, la réhabilitation du parc moins ancien et les substitutions d'énergie pour le chauffage et enfin, les premières options dans le secteur des transports.

La contribution relative de chaque secteur au potentiel total de réduction (700 ktCO₂ pour un coût marginal inférieur à 1000 €/tCO₂) qui apparaît sur la Figure 38 est très inégale. Avec plus de 400 ktCO₂, le secteur du bâtiment représente les deux tiers du potentiel identifié et le secteur de la chaleur 18%. Les transports parfois considérés comme un secteur clé pour la réduction des émissions à l'échelle locale n'apparaissent qu'en troisième position en termes quantitatifs (12% du total) et avec un niveau moyen de coût marginal élevé (plus de 500 €/tCO₂ hors covoiturage). Ce potentiel relativement faible s'explique aussi par le fait que la projection initiale de référence incorpore déjà les effets de politiques et mesures répondant à une logique plus nationale (amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules thermique et incitations à l'achat des véhicules électriques).

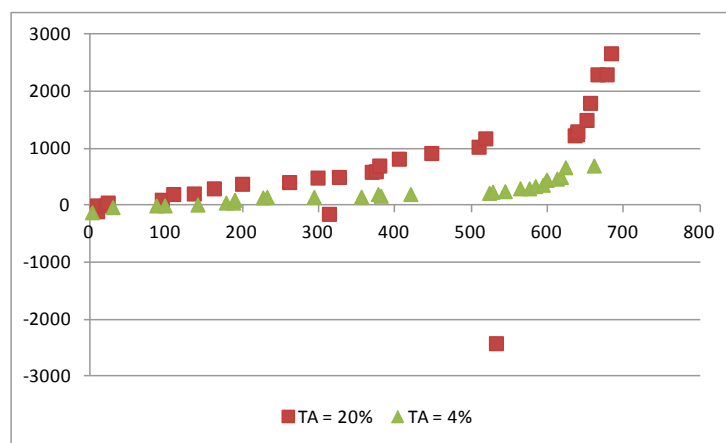
Comme indiqué dans la présentation des résultats sectoriels, les coûts élevés pour les transports indiquent l'intensité de l'effort public à engager dans ce secteur, en apparence plus importants que

²⁸ On voit peu apparaître les options dans le secteur tertiaire à ce stade parce qu'on ne dispose pas des informations sur l'âge du parc. S'il était possible de structurer le parc tertiaire par classes d'âge, on retrouverait, comme pour les logements, la réhabilitation thermique du parc ancien dans les options à moindre coût.

pour les secteurs du bâtiment ou de la chaleur, pour obtenir une quantité donnée de réductions d'émissions. Ce résultat ne doit pas conduire à s'interroger sur la pertinence d'investir dans le secteur des transports pour limiter les émissions de CO₂, mais il appelle à une réflexion approfondie sur l'ensemble des effets externes associés aux politiques de transport et qui relèvent, au delà des gaz à effet de serre, des problématiques d'accessibilité, de pollution locale, d'économie du temps... Il est clair que dans la réalité, les politiques locales de transports ne visent pas de façon principale à réduire les émissions de CO₂, ni même à limiter les externalités environnementales mais avant tout à accompagner les politiques d'urbanisme, à améliorer l'accessibilité, et à faciliter la mobilité. Les coûts élevés obtenus dans cette étude traduisent simplement le fait que certains co-bénéfices des politiques de transport urbain, dont la quantification dépassait l'objectif de ce travail, n'ont pas été pris en compte.

Les résultats qui précèdent sont obtenus dans le cas favorable d'un taux d'actualisation de 4%. Les coûts augmentent de façon importante lorsque l'on considère un taux d'actualisation reflétant les préférences des décideurs privés, en particulier un coût du capital plus élevé et donc une "préférence pour le présent" plus forte. Ainsi, alors qu'un objectif de réduction d'émissions de 700 kt de CO₂ peut être atteint en activant des mesures dont le coût reste inférieur à 1000 €/t pour un taux d'actualisation de 4%, ce même coût marginal permet au mieux d'atteindre un objectif de 450 -500 kt avec un taux d'actualisation de 20%²⁹, soit un temps de retour de l'investissement d'environ 5 ans (Figure 39).

Figure 39: Courbes de CMR globales (Scénario CU - ta = 4% et 12%/20% - limitée à 700 kt)



Une estimation approximative (notamment parce que les taux d'actualisation utilisés pour les ménages et pour la compagnie de chauffage ne sont pas identiques) du coût de la mise en œuvre des politiques permettant d'atteindre différents objectifs est indiquée au Tableau 16. Ces valeurs sont estimées à partir de la mesure des surfaces situées en dessous des courbes et indiquent donc le coût total des politiques à mettre en œuvre sur 20 ans (2010-30) pour atteindre un objectif de réduction donné. Les valeurs absolues sont certainement trop incertaines pour que l'on s'y arrête, mais les écarts entre les chiffres obtenus sont intéressants. Ces résultats illustrent l'augmentation du coût des politiques lorsque les objectifs deviennent plus ambitieux : le coût global augmente ainsi de 50%

²⁹ 12% pour la production / distribution de chaleur

lorsque les objectifs de réductions d'émissions passent de 500 kt à 600 kt³⁰ (taux d'actualisation = 4%). Ils montrent surtout l'écart important entre les coûts des politiques selon le taux d'actualisation retenu.

Tableau 16: Coût global de la politique climatique

Objectif de réduction	Coût total (M€)	
	4%	20%
700 kt	111,0	510
600 kt	91,0	344
500 kt	62,0	240

L'écart provient pour l'essentiel du secteur du bâtiment où l'application de critères d'investissement reproduisant les comportements réels des ménages se traduit par un renchérissement significatif du coût des options de rénovation thermique notamment. Les coûts obtenus avec un taux de 4% correspondraient à une situation idéale dans laquelle les barrières classiques aux investissements d'efficacité énergétique (information, financement, risque, et les coûts associés) sont largement minorées alors que le taux de 20% tente de refléter les paramètres réels de décision d'investissement des ménages.

Cet écart de coût qui peut sembler considérable peut ainsi être interprété comme une mesure de l'effort public à consentir pour rapprocher comportements réels et comportements optimaux dans un monde idéal. Mais cet effort ne doit pas être interprété comme représentant intégralement un financement supplémentaire nécessaire : la réconciliation des critères des acteurs privés et de la rationalité publique devra en effet combiner certes une part de subventions, mais aussi une part de financement adapté et enfin une part d'accompagnement et d'information.

L'analyse détaillée des courbes selon les scénarios de croissance urbaine ne produit pas de résultats vraiment discriminants à l'horizon 2030 pour des raisons déjà évoquées plus haut (cf. analyses sectorielles). En effet, les scénarios ne sont pas différenciés pour le secteur du bâtiment où les potentiels de réduction concernent exclusivement le parc existant et pour le secteur de la chaleur où les parts de marché du réseau sont supposées inchangées dans la référence 2030. Il existe toutefois des différences pour le secteur transport entre les formes des courbes de CMR et entre les coûts des politiques de réduction selon le scénario considéré. Mais ces différences restent relativement peu marquées (Cf 1. Le secteur des transports : impact des scénarios) et surtout elles ne conduisent pas à des conclusions aussi nettes selon que l'on intègre ou pas la valeur du temps dans l'analyse économique. Ainsi l'avantage économique du scénario de concentration urbaine (Tableau 8) comparé au scénario d'étalement disparaît lorsque le calcul intègre la valeur du temps d'attente pour les transports en commune. On ne peut donc pas affirmer qu'à l'horizon 2030 une trajectoire de développement urbain serait nettement plus favorable qu'une autre du point de vue de la politique climatique (cf infra).

³⁰ L'augmentation est plus limitée pour passer de 600 kt à 700 kt car on intègre alors l'option de covoiturage dont le coût unitaire négatif allège nettement le coût global de la politique.

2. Quels éléments de conclusion stratégiques ?

L'objectif du projet AETIC était d'apporter des éléments d'analyse stratégique pour le PCET de l'agglomération de Grenoble en s'appuyant sur la construction de CMR sectorielles et globale pour élaborer un programme d'action coût-efficace, identifier des priorités parmi les actions à mettre en œuvre et proposer une estimation du coût de réalisation des objectifs de réduction d'émissions. Dans cette perspective, quels enseignements peut-on tirer des résultats présentés ci-dessus ?

Tout d'abord, les potentiels de réduction identifiés par le projet représentent des quantités significatives par rapport aux objectifs définis par le PCET de l'agglomération d'une réduction de 75% des émissions à l'horizon 2050. Le volume total de réduction comptabilisé est proche de 700 kt CO₂ à comparer à un niveau d'émission estimé, pour les trois secteurs considérés, à 1338 kt en 2010 et entre 1290 et 1370 kt selon les scénarios pour 2030 (Tableau 7). Si la totalité du potentiel de réduction ainsi identifié pouvait être mobilisé en 2030, soit une baisse de 3.5%/an, cette trajectoire serait cohérente avec un objectif de réduction de -75% en 2050 par rapport à 2010. Ce résultat est intéressant car il n'était a priori pas garanti par la démarche que nous avons choisie d'identification de mesures spécifiques : pour les bâtiments, l'application d'un paquet de mesures de rénovation/substitution d'énergies à l'ensemble du parc présente un caractère systématique qui induit nécessairement un volume important de réductions ; pour les autres secteurs, les mesures retenues aurait pu produire des potentiels de réductions très inférieurs aux émissions, ce qui n'est pas le cas même si ces potentiels de réduction pour la chaleur ou les transports sont nettement inférieurs à ceux des bâtiments.

Les potentiels identifiés sont cohérents avec une trajectoire de réduction d'émissions permettant à l'agglomération de Grenoble d'atteindre le facteur 4 en 2050³¹, mais les marges de manœuvre sont relativement limitées à moyen terme. L'idée initiale était de prendre en compte le critère économique dans l'élaboration de la politique climat-énergie, en sélectionnant les mesures à mettre en œuvre de façon prioritaire et les secteurs à privilégier. Les faibles marges de manœuvre auxquelles nous aboutissons réduisent l'importance du critère économique et l'idée d'ordre de mérite dans le choix des options. Les résultats obtenus indiquent que pour se situer sur une trajectoire de réduction d'émission compatible avec le facteur 4 à l'horizon 2050, il faudrait mobiliser la quasi-totalité des options identifiées : le gisement de réduction à cet horizon serait donc pratiquement épuisé.

La forme des courbes de CMR auxquelles nous aboutissons permet toutefois de différencier les mesures à mettre en œuvre et suggère notamment de différer ou de laisser de côté certaines d'entre elles. La pente des courbes (cf Fig 35) s'accroît, en effet, très nettement après 700 kt de CO₂, le coût marginal dépassant alors 1000 €/t. Ces mesures dont les coûts d'abattement sont particulièrement élevés – la rénovation thermique du parc de bâtiments récents (après 2000) ou les bâtiments utilisant des énergies peu carbonées ou la production d'électricité photovoltaïque, par exemple – ne se justifient pas sur le seul critère des impacts climatiques. Elles ne devraient donc pas être mises en œuvre dans une stricte recherche d'efficacité économique de la politique climatique. En revanche, elles peuvent bien entendu se justifier au regard d'autres critères (diminution des factures énergétiques, rénovation de la qualité du parc bâti, augmentation de la part des énergies renouvelables locales, etc.).

³¹ Facteur 4 par rapport à la situation 2010

Le principal potentiel de réduction d'émissions se situe pour l'agglomération de Grenoble dans les bâtiments résidentiels ou à usage tertiaire, et en particulier dans le parc ancien d'avant 1974 et pour les logements chauffés au gaz et au fioul. La rénovation thermique du parc récent (après 2000) et a fortiori du parc neuf ne se justifie pas sur le plan économique si l'objectif visé est la limitation des émissions de CO₂. En revanche, le coût marginal des options de rénovation thermique ou de substitution entre modes de chauffage dans le parc ancien est particulièrement favorable : en dessous de 200 €/t pour le collectif et proche de zéro voire négatif pour l'individuel. Les données disponibles ne permettent pas de connaître l'âge du parc tertiaire mais il est probable que les mêmes conclusions pourraient être tirées pour celui-ci.

Ces valeurs (inférieures à 200 €/tCO₂) sont à rapprocher de la valeur tutélaire du carbone recommandée par la Commission Quinet qui établit à 100 €/t CO₂, en 2030, le signal-prix qu'il faudrait introduire pour orienter l'économie française sur une trajectoire compatible avec le facteur 4 en 2050.

L'existence de potentiels à coûts modérés dépend dans une large mesure des hypothèses économiques retenues et notamment un taux d'actualisation de 4% censé refléter le comportement d'un investisseur public. Or, il est clair que la collectivité ne prendra pas en charge les tous investissements nécessaires à la mobilisation des potentiels identifiés. Les coûts d'accès à ces potentiels augmentent sensiblement lorsque les hypothèses reflètent les conditions réelles de décision d'investissement pour les ménages ou pour les investisseurs privés de façon générale. L'écart entre les deux situations montre l'importance de l'effort collectif à engager pour mobiliser les potentiels de réduction d'émissions dans le secteur du bâtiment (information, incitations, subventions, prêts bonifiés, crédits d'impôts, etc.) en complément de l'introduction d'une valeur carbone incitative.

Les options identifiées dans le secteur de la chaleur (production et distribution) représentent le second potentiel de réduction d'émissions (130 kt pour un coût marginal inférieur ou égal à 500 €/t). La substitution des combustibles fossiles par de la biomasse constitue l'essentiel des gains envisagés permettant au mix de production de chaleur d'atteindre 75% de sources renouvelables pour une valeur carbone inférieure à 100 €/tCO₂. Ces résultats sont atteints avec des hypothèses réalistes (ou conservatrices) en ce qui concerne les possibilités d'extension du réseau de chaleur au-delà de ses frontières actuelles. Une analyse technico économique plus approfondie et plus fine du point de vue de la résolution spatiale pourrait confirmer l'existence, qui n'a été qu'évoquée dans le cadre d'AETIC, de potentiels complémentaires associés au développement de petits réseaux autonomes du réseau principal et alimentés par des sources locales (géothermie, énergies fatales, eaux usées, etc.).

En complément de ces options associées à la production de chaleur, deux ressources renouvelables présentent des potentiels d'abattement significatifs (11 kt CO₂ pour l'hydraulique et 12 kt CO₂ pour le PV) pour la production locale d'électricité mais avec des coûts marginaux fort différents. Compte tenu du mix électrique français et du faible contenu carbone du kilowattheure de réseau, les coûts de la tonne de carbone évitée par la production locale d'électricité restent élevés (cf photovoltaïque). La réhabilitation ou l'extension des ouvrages hydrauliques existants permettait en revanche à la production hydraulique de présenter un coût marginal faible (proche de 0 €/tCO₂ évitée) qui devrait la faire figurer dans le programme de réduction d'émissions coût-efficace.

Le potentiel de réduction associé aux émissions du secteur transport est selon nos résultats le plus faible en volume (85 kt CO₂ pour un coût marginal inférieur à 1000 €/t dans le scénario de concentration urbaine). Il est toutefois cohérent avec une trajectoire qui conduirait à une division par 4 des émissions à l'horizon 2050, par rapport à 2010. Nous avons distingué dans ce potentiel quatre grands types de mesures : innovation sur les véhicules individuels, amélioration de l'offre de transports collectifs, régulation de l'usage de la voiture par le péage et changements de comportements pour le covoiturage. Logiquement, la contribution des transports collectifs est renforcée alors que les améliorations techniques sur les véhicules individuels diminuent en proportion dans le scénario de concentration urbaine. Pour les deux autres scénarios, les potentiels des différentes options restent globalement comparables. En moyenne, la contribution des transports collectifs est légèrement en retrait.

La question du coût des mesures dans le secteur des transports est plus complexe à analyser que pour les autres secteurs en raison des difficultés à cerner les coûts de certaines options (cf. le cas du péage par exemple), de l'existence d'externalités importantes (le coût du BHNS diminue de moitié avec la prise en compte des externalités par ex.) ou de points de controverses méthodologiques (valorisation du temps et ne particulier du temps d'attente dans les transports en commun). Les résultats présentent ainsi une grande variabilité selon les niveaux de coûts considérés, chacun étant porteur de sens. Néanmoins, les coûts obtenus situent les mesures de réduction pour les transports dans une fourchette haute (200-700 €/tCO₂) comparé aux deux autres secteurs ; cela à l'exception du covoiturage qui apparaît à la fois comme une mesure très efficace mais hautement incertaine.

On dispose de peu références sur les coûts d'abattement des émissions de CO₂ dans les transports mais les exercices de modélisation du système énergétique concluent généralement que les coûts marginaux y sont plus élevés que dans les autres secteurs (industrie, bâtiment, énergie). Le matelas de taxes existant sur les carburants impose d'introduire une valeur carbone très élevée pour un signal prix significatif. Ce résultat est conforme avec ce qui est observé ici à l'échelon local. On pourrait en conclure qu'il n'est pas coût-efficace d'investir dans le secteur des transports dans le seul but de limiter les émissions de GES. En réalité, les collectivités locales n'investissent pas dans les infrastructures de transport collectif pour réduire les émissions de CO₂ mais pour des objectifs beaucoup plus larges de réduction des pollutions locales et du bruit, ou pour améliorer l'accessibilité de certains quartiers, limiter la place de la voiture en ville, pour l'image de la ville, etc.

L'analyse en cycle de vie réalisée dans le cadre du projet ³²rappelle ainsi clairement (d'un point de vue qualitatif) que les actions engagées dans les secteurs des transports, des bâtiments ou de la production locale d'énergie produisent des impacts environnementaux au-delà des seuls effets directement liés au changement climatique. Les tentatives de quantification opérées pour le secteur des transports confirment l'effet positif de certains dommages évités (bruit, pollution) mais sont plus complexes à interpréter sur d'autres externalités telles que le temps de transport, par exemple.

Le projet AETIC avait également pour ambition d'apporter des éléments de réponse à la question de l'impact de la forme urbaine sur les émissions de CO₂ et sur les coûts d'abattement auxquels peuvent conduire les différentes configurations urbaines. Nos résultats font apparaître sur ce point un impact qui peut sembler limité eu égard aux hypothèses assez contrastées que nous avons retenues dans nos scénarios (cf supra). Par construction il n'y a pas de différences pour le secteur du bâtiment.

³² Voir livrable D4.4

Pour le secteur de la chaleur, les écarts sont faibles mais conformes aux attentes avec un coût moyen d'abattement légèrement inférieur pour le scénario de concentration urbaine ce qui peut suggérer qu'une plus grande densité de demande permet un accroissement de l'offre et un moindre coût des options d'abattement.

Pour le secteur des transports, les écarts sont plus marqués : le coût moyen de réduction obtenu (pour les 4 principales mesures hors covoiturage) est de 230 €/tCO₂ pour le scénario de concentration urbaine (coût avec externalités) contre respectivement 535 et 530 €/tCO₂ pour les scénarios de renforcement multipolaire ou d'expansion urbaine. Le scénario de concentration urbaine qui minimise les distances parcourues, améliore l'usage des transports collectifs, limite la motorisation individuelle semble ainsi plus favorable à la mise en œuvre d'une politique de limitation des émissions de CO₂ qui intègre également les externalités environnementales. Cette idée qu'une ville compacte serait plus favorable en termes de politique climatique est toutefois à relativiser. Ainsi nos résultats sont modifiés lorsqu'on tient compte du temps, temps d'attente dans les transports en commun ou temps gagné par les automobilistes lorsque les congestions diminuent ; le scénario d'expansion urbaine dans lequel la voiture occupe une place plus importante devient alors le scénario le moins coûteux. Par ailleurs, les coûts de la compacité non pris en compte ici ne sont pas à négliger (réduction des surfaces habitables, îlots de chaleur, besoins de mobilité hors mobilité quotidienne, etc.) et pourraient conduire à relativiser les avantages apparents que présente le scénario de concentration pour la politique climatique. Au final, il est clair que des gains sont possibles avec la densification, mais celle-ci ne devrait pas constituer un objectif automatique en termes d'aménagement, du point de vue climatique. Des études approfondies seraient utiles pour identifier les potentiels de densification les plus intéressants, en lien avec la politique de mobilité, et les outils développés dans le cadre du projet permettent ce type d'investigation.

Il est en tous cas extrêmement probable que les pleins avantages des politiques de densification, du point de vue des émissions de CO₂, ne pourraient apparaître qu'au-delà de l'horizon 2030 considéré dans l'étude. Sous réserve d'une vérification de cette hypothèse par des études complémentaires, le fait de s'engager aujourd'hui sur des modifications des profils urbains plus denses, constitueraient alors une logique d'investissement à long terme, visant à créer les nouvelles marges de manœuvre pour la réduction des émissions entre 2030 et 2050.

3. Quels enseignements méthodologiques ?

A l'issue de ce travail de recherche exploratoire, que peut on dire de l'intérêt et de la faisabilité d'une démarche visant à élaborer des stratégies coût-efficace de réduction d'émissions de CO₂ à l'échelle d'une agglomération et s'appuyant sur la construction de courbes de CMR ?

Le projet AETIC confirme qu'il est possible de construire des courbes de CMR dans les trois secteurs-clé des transports, des bâtiments et de la production de chaleur et d'intégrer des résultats dans une courbe globale qui identifie et d'ordonne les mesures à mettre en œuvre selon l'ambition des objectifs de réduction envisagés. L'intérêt de la démarche est de donner une estimation quantifiée des potentiels de réduction sectoriels et globaux et de les situer par rapport à des objectifs de politique climatique tels que le Facteur 4. Ces courbes permettent également d'estimer le coût marginal de différents objectifs de réduction des émissions et, de façon intéressante, la non-linéarité des coûts pour des niveaux d'objectifs plus ambitieux. Enfin, la démarche propose une

hiérarchisation des mesures de réduction qui identifie les mesures à engager en priorité et à l'inverse celles qui ne devraient pas être mises en œuvre pour des objectifs climatiques uniquement.

La principale difficulté rencontrée dans la construction de ces courbes tient au fait que les mesures considérées ne sont pas indépendantes les unes des autres et qu'il n'est par conséquent pas possible d'associer à chacune des quantités de réduction et des coûts sans tenir compte des mesures engagées auparavant. Une solution partielle apportée à ce problème a consisté à considérer non pas des mesures unitaires mais des paquets de mesures cohérentes entre elles. Dans le bâtiment, les actions de rénovation thermique et de rénovation / substitution des dispositifs de chauffage ont ainsi été regroupées sous forme de paquets de mesures indépendants (rénovation maisons individuelles / collectif, avant / après 1974, etc.). Pour le secteur des transports, le nécessaire regroupement des actions unitaires n'a pas permis de contourner cette difficulté.

La forme des courbes de CMR obtenues pour le secteur des transports reflète l'impossibilité d'identifier des actions / programmes indépendants les uns des autres, et plus fondamentalement la dimension systémique des infrastructures et politiques de déplacement. L'ordonnement des actions ne correspond alors pas à un ordre de mérite mais à une logique programmatique se traduisant par une suite d'actions dont certaines peuvent avoir un coût marginal inférieur à la précédente. Ainsi au lieu d'une classique forme convexe, les CMR pour les transports présentent des parties concaves qui correspondent à des actions à faibles coûts mais qui ne peuvent être activées que lorsque d'autres actions plus coûteuses ont été engagées.

Enfin, la construction des courbes de CMR a conduit à relever le problème d'un équilibre offre-demande à construire dans les interactions entre les secteurs du bâtiment et de la chaleur. La baisse de la demande de chaleur adressée au réseau du fait des programmes de rénovation thermique influe en effet sur le coût de la chaleur distribuée en raison de la structure de coûts de ce dernier et donc en retour sur la demande. Une interface prix-quantités a été mise en place entre les deux secteurs mais de manière récursive sans la réalisation d'un équilibre complet qui aurait nécessité de disposer d'un modèle du système énergétique local intégrant offre et demande de chaleur.

L'ambition du projet AETIC était d'aller plus loin que la classique représentation des courbes d'offre de réduction d'émissions (type McKinsey) qui considèrent les options prises isolément et n'intègrent que de façon partielle les interactions entre options et entre secteurs. Le projet était de construire des courbes de CMR en tenant compte de ces interactions, mais sans pour cela recourir à un modèle technico-économique bouclé sophistiqué, de façon à conserver une certaine transparence à la démarche. Sur ce point, AETIC aura fait apparaître les problèmes de fond que soulève la construction de CMR si l'on souhaite traiter de façon rigoureuse les interactions au sein du système énergétique local, et la nécessité pour aller plus loin de recourir à un modèle décrivant cette complexité.

L'autre défi du projet AETIC était d'être en mesure d'intégrer dans la construction des CMR la composante urbanisme, et plus particulièrement le lien entre l'évolution de la forme urbaine et la politique climatique, une dimension complémentaire que ne traitent habituellement pas les courbes d'offres de réduction d'émissions. Pour cela le choix a été fait d'utiliser un modèle susceptible de représenter ces liens complexes entre aménagement, demande de mobilité, infrastructure de transport, choix modaux, etc. Cette modélisation transports-usage des sols était nécessaire pour simuler de façon robuste l'équilibre transports-usage des sols en 2030 à l'échelle de l'agglomération,

et tester à la fois des mesures de nature incrémentale et des programmes présentant un réel caractère systémique.

TRANUS a également permis de simuler des évolutions contrastées de l'agglomération sous forme de trois scénarios structurants qui devaient permettre de tester l'impact de la forme urbaine sur les politiques climatiques. Sur ce plan comme nous l'avons dit les résultats restent peu différenciés à 2030, alors même que les scénarios s'appuient sur des hypothèses assez contrastées. Ce résultat ne signifie pas que les formes urbaines (plus compacte ou plus étalée) ne se différencient pas du point de vue des impacts climatiques et du coût des options à mettre en œuvre (on observe de fait un avantage en faveur de la compacité), mais plus probablement que ces impacts sont peu visibles³³ sur le périmètre et à l'horizon de temps considéré. Le choix de l'année 2030 et le périmètre de l'agglomération étaient justifiés pour apporter des éléments d'analyse sur le Plan Climat de l'agglomération de Grenoble, mais les marges d'évolution en termes d'urbanisme sont relativement peu importantes dans ces conditions. Dans un système urbain à la croissance relativement faible comme celui de la région urbaine de Grenoble, les possibilités d'aménagement du territoire restent limitées à l'horizon 2030 et les évolutions lorsqu'elles existent, se jouent clairement à une échelle territoriale plus large que celle de l'agglomération, déjà fortement dense. Pour tester l'impact des variables d'urbanisme, le périmètre d'AETIC devrait être étendu au périmètre du SCOT et à l'année 2050. Le prix à payer aurait été celui d'une perte de précision sur l'identification et la quantification des options techniques disponible pour une échéance aussi éloignée.

³³ Ils restent dans la marge d'incertitude au vu de la sensibilité à certains paramètres

VII. Conclusions sur le projet et perspectives

Les principaux résultats opérationnels du projet :

1. Les potentiels identifiés à l'horizon 2030 avec un taux d'actualisation de 4%, dans les trois secteurs que sont les transports (de personnes), les bâtiments et les réseaux énergétiques permettent d'atteindre un objectif de réduction de l'ordre de 50% par rapport aux émissions de l'agglomération en 2010 (soit une quantité de réduction de l'ordre de 700 kt de CO₂)
2. Selon ces résultats, le secteur du bâtiment est celui qui présente le principal potentiel de réduction. Les potentiels identifiés dans le secteur de la chaleur et celui des transports sont sensiblement moins importants. Dans le secteur du bâtiment, il convient de privilégier les actions en direction du parc existant, et tout particulièrement du parc ancien (avant 1974).
3. La forme de la courbe de CMR globale montre des coûts marginaux très rapidement croissants au-delà de cet objectif de réduction de 50% (700 kt) suggérant qu'au-delà de 2030 il sera très difficile de dépasser cet objectif si des potentiels complémentaires ne sont pas identifiés.
4. Les coûts marginaux pour les dernières mesures correspondant à cet objectif sont élevés (au-delà de 500 €/t), nettement supérieurs à ceux préconisés à cet horizon par le rapport Quinet par exemple.
5. Les coûts plus élevés obtenus avec un taux d'actualisation reflétant les préférences des acteurs privés (12 et 20%), les ménages pour le secteur du bâtiment en particulier, suggèrent qu'une des questions-clé, au delà de celle du choix des options, portera sur les instruments réglementaires, d'incitation ou d'information à mettre en place en complément de l'introduction éventuelle d'une valeur carbone pour mobiliser les potentiels identifiés.
6. Les résultats ne font pas apparaître d'impact majeur de la forme urbaine sur les stratégies de réduction d'émission : on observe certes des écarts pour le secteur des transports à l'avantage du scénario de densification par rapport à l'étalement, cependant l'introduction de certaines externalités peut modifier les conclusions ; ainsi, la prise en compte des temps d'attente a un impact significatif dans les scénarios intensifs en transports en commun. Le principal enseignement est que l'horizon de temps considéré est trop rapproché et le périmètre trop restreint pour que la variable forme urbaine puisse avoir une influence significative.
7. Pour le long terme, au-delà de 2030, c'est cependant dans ces évolutions des structures urbaines que pourront être trouvés les nouvelles sources de baisse structurelle des émissions, nécessaires pour aller au-delà des 50% identifiés par cette étude (cf. le point 3. supra).

Outre les résultats évoqués ci-dessus, le projet aura permis :

1. De développer une méthodologie complète pour l'évaluation économique des principales mesures à déployer dans un plan climat. Si cette méthodologie est encore améliorable, la démarche d'ensemble aura été validée et les besoins en données et en outils de simulation clairement identifiés. Cette méthodologie est certainement répliquable, avec adaptations pour tenir compte des données locales, sur d'autres expériences de Plan Energie-Climat.
2. D'élaborer plusieurs bases de données décrivant de façon détaillée le système urbain de l'agglomération de Grenoble, notamment, la caractérisation du parc de bâtiments, la

description du système énergétique et des réseaux de transport, le bilan énergétique et les émissions de CO₂, l'identification des principales options techniques de réduction d'émission dans les transports, les bâtiments, les ressources énergétiques locales.

3. De développer des outils de calcul pour la construction des courbes de coût marginal dans le secteur du bâtiment - MOBAT calcule la performance économique de différentes options de réhabilitation thermique et de réduction de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂ sur un parc de bâtiments donné, avec différentes hypothèses de prix de l'énergie et de valeur carbone – et pour le secteur de l'énergie - l'outil de calcul AETIC décrit la production de chaleur sur le réseau (et la production d'électricité EnR&R) et simule le mix de production d'énergie adapté en fonction des scénarios de développement urbain et des prix des énergies.
4. La première application réussie du modèle TRANUS en France avec la collecte et l'intégration de l'ensemble des données nécessaires à la représentation du fonctionnement du système usage des sols-transport de l'agglomération de Grenoble ; la calibration effectuée en collaboration avec les autorités locales (Communauté d'agglomération, autorité organisatrice des transports, agence d'urbanisme, ...) et la simulation de trois scénarios d'évolution de la forme urbaine.

... mais il aura également soulevé différentes questions, ainsi :

1. Si toutes les options de réduction ont bien été identifiées, quelles marges de manœuvre subsiste-t-il en termes de choix politique ? La démarche a permis d'identifier les options les plus coûteuses qu'il faudrait laisser de côté (les bâtiments neufs par exemple) mais quel est l'intérêt de l'ordre de mérite dès lors que la quasi-totalité des options doivent être mises en œuvre ?
2. Comment financer les mesures ainsi identifiées ? L'écart entre les taux d'actualisation public et privé -4 et 20 %- reflète bien la réalité en particulier pour le bâtiment et il est très marqué ; quelles mesures d'incitation imaginer et quel serait le coût des aides financières ou subventions qui semblent indispensables ?
3. Si la politique des transports apparaît comme une dimension très importante des politiques climatiques, il est également clair que les déterminants des décisions, les enjeux et les coûts ou avantages associés dépassent de beaucoup le cadre de la seule politique énergie-climat.

A l'issue du projet, la démarche suivie nous semble toujours pertinentes mais plusieurs limites méthodologiques ont été identifiées :

1. L'absence de prise en compte du cheminement et de la trajectoire : les courbes sont construites pour une image fixée à 2030, sans indication du chemin à suivre entre 2010-30 ou du prolongement des trajectoires au-delà.
2. La dépendance des coûts des options au périmètre des coûts privés et sociaux-environnementaux considérés qui conduit à s'interroger sur le concept de CMR: quel niveau d'externalités faut il prendre en compte (environnement + temps) ? ; comment traiter des comportements d'investissement différents ?
3. Les problèmes complexes posés par l'interaction entre les mesures et entre les secteurs rendent difficile la construction de CMR prenant en compte ces interactions et intégrant des mesures à caractère systémique : est il possible d'aller plus loin sans recourir à un modèle

global intégré décrivant le système énergétique local et l'interaction transport-usage des sols ?

4. Les échelles de temps longues qui caractérisent les transformations urbaines ouvrent sur la contradiction centrale entre la nécessité d'effectuer en trois ou quatre décennies une transition majeure des systèmes sociotechniques urbains et la prise en compte des inerties d'infrastructures et de comportements.
5. Enfin, la sensibilité des résultats à différents paramètres (prix de l'énergie), la représentation simplifiée de certains domaines (tertiaire), la non disponibilité ou la fiabilité insuffisante des données parfois conduisent à considérer les conclusions présentées avec précaution. Des analyses complémentaires de sensibilité à différents paramètres sont certainement nécessaires pour apporter de la robustesse à ces résultats.

Les difficultés méthodologiques et les solutions qui y ont été apportées au cours du projet auront permis d'identifier de nouvelles pistes de recherche complémentaires et de mettre en place de nouvelles collaborations :

1. Pour le développement d'outils facilitant et améliorant la modélisation transport – usage des sols, en particulier le modèle TRANUS (projet CITIES déposé à l'ANR ; projet ECONOR : IDDRI, INRIA, MODELISTICA).
2. Pour tester la faisabilité et le caractère opératoire d'une modélisation intégrée, bâtiments, transports, usage des sols et systèmes énergétiques locaux (INRIA, le LEPII-EDDEN et l'IDDRI).
3. Pour l'approfondissement et la mise en œuvre de la méthodologie AETIC sur le Grand Lyon (contacts VEOLIA, IDDRI, Enerdata)

Table des illustrations - Figures

Figure 1 : Courbe d'offre de réduction d'émissions pour la ville de Londres.....	15
Figure 2 : Les objectifs du plan air climat de l'agglomération de Grenoble	17
Figure 3 : Courbe d'offre de réductions d'émissions	20
Figure 4 : Construction des courbes d'offre	21
Figure 5 : Réductions d'émissions 2010 / 2030.....	21
Figure 6 : Des courbes d'offre de réduction non convexes.....	25
Figure 7 : Des potentiels de réduction à coûts négatifs.....	28
Figure 8: Impact du choix du taux d'actualisation sur les courbes de CMR	29
Figure 9: Construction de la CMR (représentation théorique)	30
Figure 10: Le modèle transport – usage des sols TRANUS.....	33
Figure 11: Trois grands scénarios structurants	35
Figure 12: Les schémas de développement de l'agglomération de Grenoble	36
Figure 13: le scénario d'expansion urbaine (taux de croissance de la population par zone).....	37
Figure 14: le scénario de concentration urbaine (taux de croissance de la population par zone)	38
Figure 15: le scénario de renforcement multipolaire (taux de croissance de la population par zone)	38
Figure 16: Augmentation du nombre de ménages	39
Figure 17: Augmentation du nombre d'emplois	39
Figure 18: CMR Transports (sans externalités) – Scénario Concentration urbaine - TA=4%	48
Figure 19: CMR Transports (avec externalités) – Scénario Concentration urbaine - TA=4%	49
Figure 20: CMR Transports (avec externalités et prise en compte du temps) – Scénario Concentration urbaine - TA=4%	50
Figure 21: CMR Transports (sans externalités) – Scénario Concentration urbaine - TA=20%	50
Figure 22: CMR Transports (avec externalités environnement) – Scénarios Concentration /Expansion - TA=4%	51
Figure 23: Trajectoires d'émissions – Référence et 5 mesures pour les 3 scénarios	52
Figure 24: Réductions d'émissions par type de mesure – Echelle SCOT – Ref 2030.....	53
Figure 25: Structure du modèle MOBAT.....	60
Figure 26: Courbe de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 4%)	62
Figure 27: Courbe de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 4%)	63
Figure 28: Courbe de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 20%)	63
Figure 29: Courbes de CMR pour le secteur du bâtiment (ta = 4% et 20%).....	64
Figure 30: Plan du réseau de chaleur et des moyens de production de la CCIAG	67
Figure 31: Interactions demande et offre de chaleur	69
Figure 32: Evolution de la demande de chaleur réseau et évolution du mix de production de chaleur pour différentes valeur carbone (scénario Concentration Urbaine – taux actualisation : 4%)	70
Figure 33 : Courbe de CMR pour le secteur de la chaleur (scénario Concentration Urbaine – ta=4%)	72
Figure 34: Evolution de la demande de chaleur réseau et évolution du mix de production de chaleur pour différentes valeur carbone (scénario Concentration Urbaine) – TA = 12%	74
Figure 35: Courbe de CMR pour le secteur de la chaleur (scénario Concentration Urbaine) – TA = 4% / TA = 12%	75
Figure 36: Courbes de CMR pour les 3 scénarios (taux d'actualisation = 4%)	75
Figure 37: Courbes de CMR globale en 2030 (Scénario Concentration Urbaine - taux d'actualisation = 4%)	78
Figure 38: Courbes de CMR globale en 2030 (Scénario CU - ta = 4% - suppression options > 1000 €/tCO2).....	78
Figure 39: Courbes de CMR globales (Scénario CU - ta = 4% et 12%/20% - limitée à 700 kt).....	80

Table des illustrations – Tableaux

Tableau 1 : Répartition des émissions de GES (en 2010)	18
Tableau 2 : Hypothèses de prix de l'énergie pour situation de référence 2030	23
Tableau 3 : Calcul des VAN de chaque option par valeur carbone croissante	30
Tableau 4 : Consommation d'énergie du résidentiel par communes (2010-2030).....	41
Tableau 5: Consommation totale d'énergie du résidentiel et évolutions (2010-2030)	42
Tableau 6: Emissions CO2 pour le résidentiel et le tertiaire (2010-2030)	42
Tableau 7: Emissions totales de CO2 (2010-2030).....	42
Tableau 8: Bilan socio-économique – 3 scénarios (avec/sans covoiturage)	54
Tableau 9: Base de données bâtiments (source INSEE)	55
Tableau 10: Energies de chauffage – parc de maisons individuelles (% de logements)	56
Tableau 11: Consommations d'énergie de chauffage / Emissions CO2 (chauffage) du parc de bâtiments.....	56
Tableau 12: Coût complets des options de rénovation pour les logements.....	58
Tableau 13: Potentiels de réduction d'émissions pour les bâtiments	61
Tableau 14: Estimation de la ressource biomasse forestière (échelle département)	65
Tableau 15: Energies renouvelables et de récupération : gisement exploité et potentiels mobilisables.....	66
Tableau 16: Coût global de la politique climatique.....	81