HAL
open science

Le métabolisme énergétique d'un territoire

Jean-Yves Courtonne, Petros Chatzimpiros, Daniela Perrotti, Anne Vernay, Manuel Blouin

To cite this version:

Jean-Yves Courtonne, Petros Chatzimpiros, Daniela Perrotti, Anne Vernay, Manuel Blouin. Le métabolisme énergétique d'un territoire. Nicolas Buclet. Essai d'écologie territoriale : l'exemple d'Aussois en Savoie, CNRS Editions, 2015, 978-2-271-08887-1. hal-01685652

HAL Id: hal-01685652

https://inria.hal.science/hal-01685652

Submitted on 16 Jan 2018

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.

Le métabolisme énergétique d'un territoire

Chapitre de l'ouvrage *Essai d'écologie territoriale : l'exemple d'Aussois en Savoie*[1]

Jean-Yves Courtonne[1], Petros Chatzimpiros[2], Daniela Perrotti[3], Anne-Lorène Vernay[4], Manuel Blouin[5]

1. Univ. Grenoble Alpes, CERAG, F-38000 Grenoble, France, CNRS, CERAG, F-38000 Grenoble, France, Inria équipe STEEP, Artelia Eau & Environnement

2. Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Institut des Énergies de Demain (IED), Paris, France

3. INRA Versailles-Grignon, UMR SAD-APT INRA/AgroParisTechGIS R2DS Île-de-France

4. Grenoble Ecole de Management - Département management, technologie et stratégie, Grenoble, France

5. Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC, UPMC, CNRS, IRD, INRA, Paris Diderot), Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (UMR 7618), 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France

---

[1] Nicolas Buclet. Essai d'écologie territoriale : l'exemple d'Aussois en Savoie. Buclet Nicolas. CNRS Editions, 2015, 978-2-271-08887-1.

Ce chapitre vise à présenter le territoire de la commune d'Aussois à travers le prisme de l'énergie. Trois questions jouent le rôle de fil conducteur : 1) Qu'est-ce qu'une analyse du métabolisme énergétique à l'échelle d'un territoire ? 2) A quels questionnements permet-elle de répondre et quelles en sont les limites ? 3) Quels sont les défis liés à la réalisation de ce type d'analyse, notamment en termes de collecte de données ?

Ce chapitre est organisé comme suit : nous commençons par présenter le cadre épistémologique du chapitre en définissant les concepts utilisés. Nous présentons ensuite de manière théorique trois périmètres possibles d'analyse du métabolisme d'un territoire ainsi que des questionnements associés. La troisième section est consacrée à l'application du premier périmètre à la commune d'Aussois pendant trois grandes périodes dans son histoire énergétique. Le chapitre se termine sur la présentation et la quantification des échanges d'énergie au sein du territoire, c'est-à-dire entre les espaces bâtis, forestiers et agricoles. Tout au long du chapitre, nous tentons de mettre en exergue l'impact du potentiel énergétique du territoire et des décisions prises par les acteurs sur son développement et son métabolisme énergétique. Ce chapitre permet ainsi de faire le lien avec les chapitres sur la création de richesse et sur la trajectoire socio-écologique du territoire.

1) Cadre épistémologique

L'écologie territoriale propose d'analyser les circulations énergétiques et matérielles au sein des sociétés et entre les sociétés et leurs milieux, en prenant en compte la dimension spatiale qui y est associée ainsi que les dimensions sociales, économiques, politiques et techniques des flux (Barles, 2010). C'est bien cette approche « par le territoire » qui la différencie de l'écologie industrielle qui privilégie une entrée par le site, la filière ou le produit. Cette approche impose par conséquent une définition du périmètre « en deçà » duquel l'analyse des processus naturels et sociotechniques demeure pertinente (Brullot et al, 2014). Nombreuses sont pourtant les difficultés, voire même les limites, d'une telle procédure ; à chaque étape du bilan métabolique, elle soulève des questions quant à la cohérence entre choix faits et finalité ultime du travail (Minx *et al*., 2011).

Le concept de territoire est par essence pluridisciplinaire. Il associe une réalité géographique à la fois physique (en général une entité administrative comme une commune, un département, une région, un pays…) et humaine (démographie et activités anthropiques liées).
Puisque les entités administratives sont définies sur une base géographique, elles constituent des systèmes continus dans l'espace. A l'inverse, les systèmes sociaux, économiques, politiques et techniques sont souvent caractérisés par une distribution spatialement discrète de leurs éléments. Leur constitution en systèmes fonctionnels s'appuie sur l'identification des réseaux qui les relient. De ce fait, les systèmes humains sont des systèmes qui ne coïncident pas toujours avec les entités physiques géographiques continues. On est confronté à ce décalage lorsqu'on s'intéresse à l'analyse du métabolisme d'un territoire. L'analyse du métabolisme énergétique de la commune d'Aussois nécessite donc de coupler une approche physique sur le territoire avec une description des structures réticulaires qui l'organisent.

Définitions de quelques concepts

L'énergie technique fait référence à toutes les sources d'énergie utilisées par nos sociétés industrielles. Cela inclut les combustibles fossiles, fissiles et renouvelables ainsi que les énergies hydrauliques et éoliennes.

On parle d'énergie biologique lorsqu'on fait référence au contenu énergétique de la biomasse – son pouvoir calorifique.

L'énergie primaire est celle qui peut être directement extraite dans la nature : pétrole brut, gaz naturel, combustibles fissiles, bois-énergie etc. L'énergie finale est celle que l'on consomme (produits pétroliers raffinés, électricité etc.). Le passage de l'énergie primaire à l'énergie finale s'accompagne de pertes dissipatives liées aux transformations et à la distribution de cette énergie. Par ailleurs, dans les bilans réalisés, nous utilisons indifféremment les unités Tep/kTep et MWh/GWh (1 Tep = 11,63 MWh).
NB : si la biomasse alimentaire est prise en compte comme un vecteur d'énergie, alors l'énergie finale est la valeur calorique des aliments directement consommés alors que son équivalent primaire correspond au produit calorique de la photosynthèse. La différence entre les deux est principalement due aux pertes de transformation dans les industries agro-alimentaires et/ou aux pertes liées au métabolisme animal, intrinsèques au transfert d'énergie entre deux niveaux trophiques.

Les services écosystémiques sont des bénéfices que les humains tirent des écosystèmes. En suivant la classification du Millenium Ecosystem Assessement (MEA, 2005), il existe quatre types de services écosystémiques : les services de support (production primaire, recyclage des nutriments, formation de sol…), d'approvisionnement (en nourriture, eau de consommation, fibres pour les vêtements, bois pour la construction ou le chauffage…), de régulation (régulation du climat, de la qualité de l'air, des inondations, des maladies…) et culturels (services récréatifs, éducatifs, spirituels). .Les services écosystémiques ne sont typiquement pas comptabilisés par le système économique. Par exemple, l'énergie solaire permettant de faire pousser des plantes sur un territoire n'est pas achetée par l'exploitant de la biomasse qui en résulte. Il existe aujourd'hui plusieurs tentatives visant à évaluer la contribution des services écosystémiques à notre société (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009).
De plus, des travaux récents mettent en avant la nécessité d'élaborer un cadre « augmenté » du métabolisme urbain, intégrant les services écosystémiques, de régulation de la qualité de l'air, de l'eau et du climat notamment, fournis par les infrastructures vertes et bleues[2] en ville (Holmes et Pincetl, 2012 ; Pincetl *et al.*, 2012). Ces approches s'inscrivent dans la lignée de l'« integrative science » synthétisée par E. Odum et ses collaborateurs, postulant la nécessité d'incorporer des indicateurs bio-physiques et socio-économiques dans un système conceptuel holistique (Barrett, 2001). La question de la compatibilité et comparabilité d'indicateurs dédiés aux services écosystémiques fournis par l'eau et le végétal en ville demeure cependant à creuser.

La facture énergétique d'un territoire fait référence à la somme d'argent versée par les acteurs du territoire pour répondre à leur demande en énergie. Elle se calcule en faisant le solde financier des productions, importations et exportations d'énergie. En fonction des caractéristiques du territoire considéré, ces calculs peuvent concerner aussi bien les échanges d'énergie primaire que finale.

2) Périmètres d'une approche « classique » de l'énergie

[2] Les infrastructures vertes et bleues, aussi connues sous le nom de trames vertes et bleues, font référencent aux réseaux écologiques développés afin d'assurer la continuité des espaces naturels (terrestres ou en zones aquatiques/humides) (Arrif et al 2011).

Le point de départ de toute étude sur le métabolisme énergétique est de fixer les limites du système à analyser (Fischer-Kowalski et Hüttler, 1999). Il s'agit d'isoler ce qui fait partie du système et de ce qui fait partie de son environnement. Etant donné le foisonnement de questions posées par la thématique énergétique, il semble important de mettre en regard les objectifs auxquels on souhaite répondre avec les méthodes et périmètres de comptabilisation adéquats. Si l'on s'intéresse à la consommation énergétique du territoire délimité par ses frontières administratives, on peut distinguer trois niveaux de complexité dans les méthodes d'analyse. Les bilans énergétiques associés servent également à estimer les émissions directes et indirectes de dioxyde de carbone d'un territoire et peuvent être utilisés à des fins de prospective énergétique.

2.1) *Niveau 1 : flux d'énergie physiquement observables sur le territoire*

Il est tout d'abord possible de regarder uniquement les flux d'énergie physiquement présents sur le territoire : production, importations, exportations et consommation. Si aucune production d'énergie n'a lieu sur le territoire, cela revient à compter la consommation d'énergie finale du territoire. Si en revanche une unité de production d'énergie est présente sur le territoire, elle doit être considérée comme partie intégrante de l'industrie du territoire. Il faut alors comptabiliser l'énergie qu'elle transforme et non l'énergie qu'elle produit, c'est-à-dire comptabiliser l'énergie primaire entrant dans l'économie du territoire. Dans les deux cas, on mesure des flux physiques qui pourraient être mesurés sur place. Cette approche est généralement utilisée lorsqu'un territoire réalise son bilan énergétique. Elle répond au questionnement suivant : à la date du bilan, quelle quantité d'énergie est produite (transformée) sur le territoire et quelles autres quantités sont importées (et/ou exportées) pour assurer son fonctionnement. La facture énergétique du territoire peut être calculée à partir de ces chiffres.

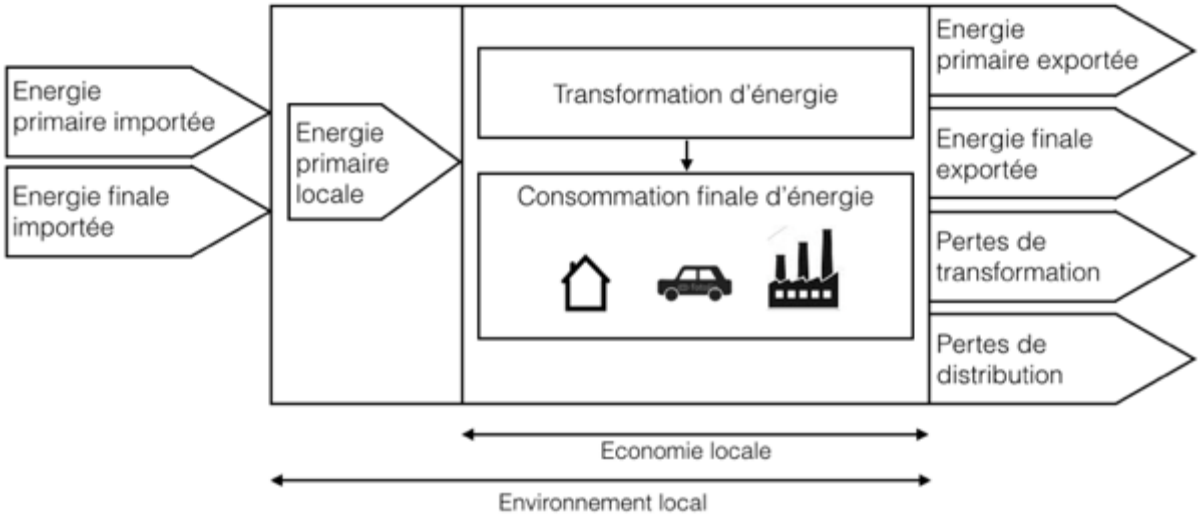


Figure 1 : 1er niveau de comptabilisation des flux d'énergie : flux « directement observables ».

2.2) *Niveau 2 : flux d'énergie directement et indirectement liés au territoire*

Le second niveau consiste à ajouter au périmètre précédent les quantités d'énergie indirectement contenues dans les flux d'énergie traversant le territoire. Ces quantités indirectes sont virtuelles du point de vue du territoire car elles ne peuvent être mesurées

physiquement qu'au lieu de la production (ou du transport) de l'énergie. Il s'agit donc d'une comptabilisation de l'équivalent énergie primaire mobilisée par le territoire. Cela constitue une étape préalable à l'évaluation de l'empreinte environnementale d'un territoire (Barles, 2010).

C'est à ce niveau que se situent les Analyses de Flux de Matière (AFM) prenant en compte les flux indirects. Eurostat (2001) a proposé une standardisation des analyses de flux « sur toute l'économie » sur la base de travaux développés dans les années 1990 (Bringezu *et al.*, 1997), facilitant ainsi la comparaison entre les études réalisées. Dans cette méthode de bilan de matière, originairement conçue à l'échelle nationale, les énergies fossiles sont considérées comme produit importés ou issus d'extraction locale, participant avec d'autres produits (biomasse, minéraux) aux entrées directes de matière dans le système (Direct Material Input). Une fois adaptée à l'échelle urbaine ou régionale (Hammer *et al.*, 2003), elle permet de répondre à deux types de questions. Si le territoire devait produire lui-même toute l'énergie qu'il mobilise, combien d'énergie devrait-il transformer ? Quel est le niveau d'externalisation de la consommation énergétique du territoire et quels impacts peuvent-ils y être associés ?

En général, les AFM basées sur la méthode Eurostat comptabilisent uniquement l'énergie technique mise en œuvre pour assurer le fonctionnement d'un territoire, en d'autres termes l'énergie participant au maintien de son système économique. C'est à partir de la formalisation de la méthode d'Analyse des Flux de Matière et d'Energie (AFME), caractérisant le métabolisme « socio-économique » des territoires, que l'énergie biologique a commencé à être prise en compte dans les bilan énergétiques (par exemple Haberl, 2001, Krausmann and Haberl, 2002 ; Schandl and Schulz, 2002 ; Fischer-Kowalski and Haberl, 2007; Kim and Barles, 2012 ; Krausmann, 2013 ; Kim, 2013).

Ce besoin s'est tout particulièrement fait sentir pour les études adoptant une perspective historique et visant à étudier le métabolisme énergétique d'un territoire à une période où l'énergie technique ne représentait qu'une partie du métabolisme énergétique d'un territoire.

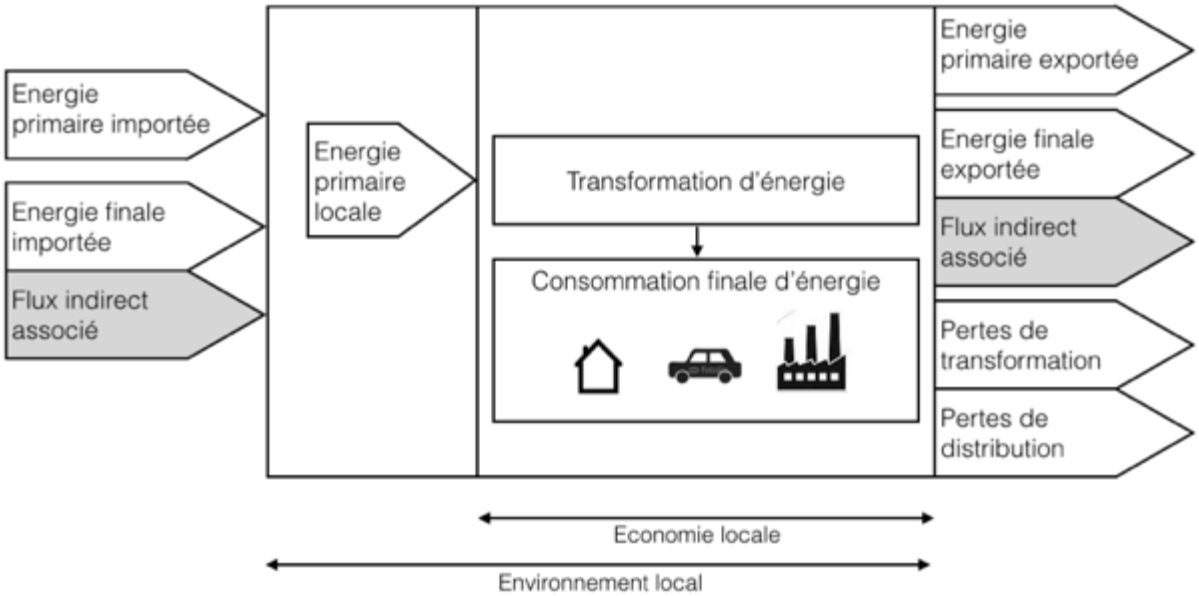


Figure 2 : 2e niveau de comptabilisation des flux d'énergie : prise en compte de l'énergie « cachée » dans les flux d'énergie finale importés et/ou exportés.

2.3) *Niveau 3 : ajout de l'énergie grise contenue dans les échanges de biens et services.*

On ajoute au périmètre précédent l'énergie indirectement incorporée dans la totalité des marchandises qui sont importées par le territoire (aussi appelée énergie grise). Cela conduit à compter l'énergie primaire nécessaire à la fabrication de chaque bien utilisé par le territoire. Cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la dépendance du territoire vis-à-vis de l'extérieur sur la question énergétique en lien avec les services et matériaux : s'il ne pouvait rien échanger, il faudrait que le territoire transforme telle quantité d'énergie pour maintenir le même fonctionnement (bien entendu, il s'agit d'une interprétation purement théorique, l'énergie n'étant pas le seul facteur de production limitant). D'autre part, cela permet de mesurer les externalités que fait peser le territoire sur le reste du monde (toujours vis-à-vis de la question énergétique). Notons que cette estimation de l'énergie grise est particulièrement ardue puisqu'elle nécessite de fait une connaissance de l'ensemble des flux de biens et services importés et exportés par le territoire et leurs conditions de production.

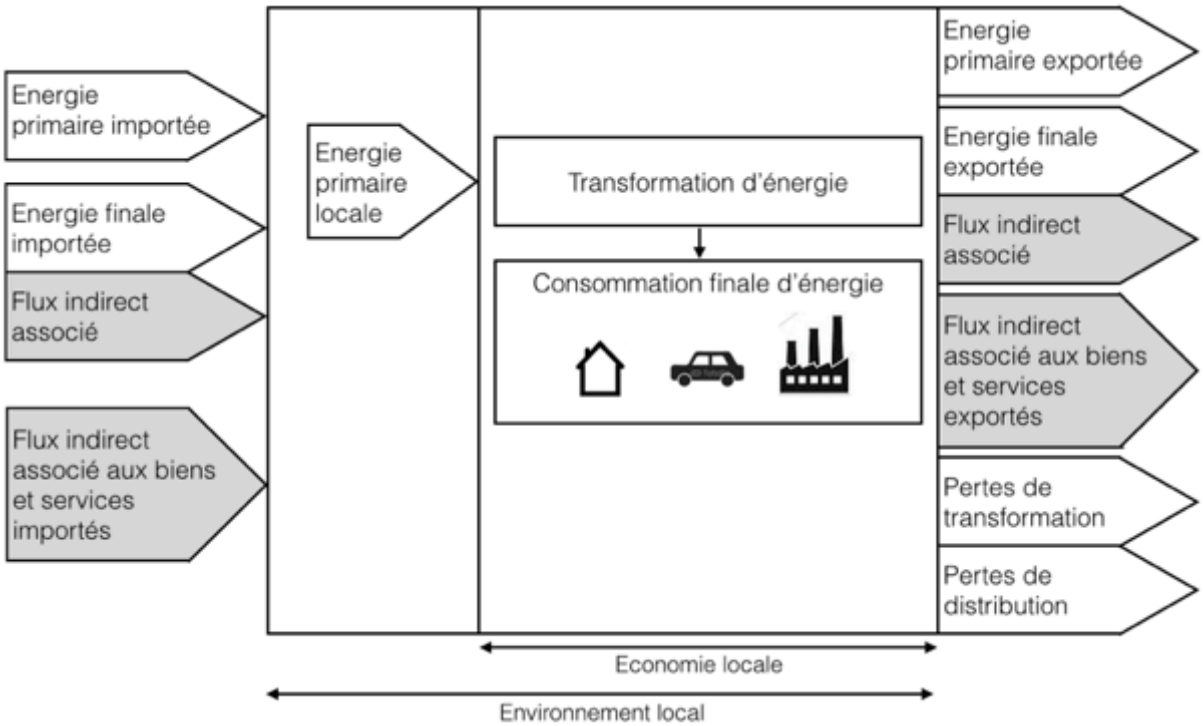


Figure 3 : 3e niveau de comptabilisation des flux d'énergie : ajout de l'énergie grise des biens et services.

3) Application à Aussois

Le village d'Aussois se caractérise avant tout comme un espace montagnard, combinant pâturages, espaces boisés et abondance de la ressource en eau dans un domaine géographique au relief marqué. D'un point de vu énergétique, le métabolisme de cette commune de Maurienne peut se décliner en trois grandes périodes : une période agro-pastorale (jusqu'au début du XXe siècle) ; une période d'industrialisation en lien avec l'exploitation de la houille blanche (jusqu'au milieu du XXe siècle) ; une période de développement touristique (jusqu'à aujourd'hui). Cette section vise à reconstituer le métabolisme énergétique d'Aussois dans le « niveau 1 » tel que décrit ci-dessus. Cet exercice sera réalisé de façon assez générale pendant les deux premières périodes et de façon plus complète pendant la troisième.

3.1) *Le métabolisme énergétique d'Aussois jusqu'au début du XXe siècle*

Jusqu'au début du XXe siècle, les habitants d'Aussois vivent principalement de l'activité agropastorale et l'autoconsommation est largement répandue. L'approvisionnement en énergie repose quasi exclusivement sur le bois et en particulier sur l'affouage : chaque famille du village peut disposer d'un lot de 3 à 4 m^3 par an. Les habitants utilisent également un peu de charbon acheté à des marchands ambulants. Les travaux agricoles sont principalement menés à l'aide de l'énergie mécanique animale. En 1900, l'on compte la présence de 21 mulets sur le territoire de la commune (environ un demi-mulet par famille). Les déplacements des habitants en hiver se font principalement en ski, notamment vers les deux principaux centres limitrophes, Modane et Sardières. On peut ainsi estimer la consommation d'énergie par ménage à 8 MWh (0,7 Tep) par an à cette période (sans prendre en compte l'énergie biologique). Sachant que le village comptait environ 100 ménages en 1900 (pour 510 habitants), la consommation totale avoisinait probablement les 800 MWh (70 tep).

3.2) *Le métabolisme énergétique d'Aussois jusqu'au milieu du XXe siècle*

L'électrification n'intervient que dans les années 1920 et ne concerne dans un premier temps que l'éclairage public. La transition massive vers les énergies fossiles et l'électricité n'intervient quant à elle qu'après la Deuxième Guerre mondiale.
Aussois bénéficie d'une géographie propice au développement de l'énergie hydraulique. Amorcée à la fin du XIXe siècle, l'exploitation de la « houille blanche » s'accompagne d'une conquête énergétique de l'espace montagnard et ce tout particulièrement dans les Alpes du Nord (Veyret et Veyret, 1970). Après une période de ralentissement lors et entre les deux guerres, le développement de l'hydroélectricité reprend de plus belle après la Seconde Guerre mondiale. Pour la commune d'Aussois, cela concerne la construction de deux barrages, Plan d'Aval et Plan d'Amont, achevé en 1950 et 1955 (EDF, 2014). Ces barrages servent entre autre à alimenter la soufflerie du complexe ONERA[3] de Modane-Avrieux ainsi que la centrale d'Aussois construite à proximité (EDF unité de production Alpes 2013).
A cette période, on peut estimer une consommation par ménage de l'ordre de 13 MWh (1,1 Tep), en augmentation par rapport à la période précédente avec les débuts du raccordement à l'électricité. Cependant, avec la chute de la population (environ 70 ménages pour 340 habitants), la consommation du village augmente finalement peu, à 910 MWh (78 Tep).

3.3) *Le métabolisme énergétique d'Aussois jusqu'à aujourd'hui*

La construction des barrages hydroélectriques représente un véritable tournant pour la commune. Après avoir connu un déclin démographique en relation avec le recul de l'activité agropastorale et la migration vers les villes industrielles, Aussois décide d'utiliser les impôts payés par EDF afin de développer son modèle de station de ski communale. L'ambition est claire : permettre aux jeunes de pouvoir "vivre et travailler au pays" (Destination Haute-Maurienne, non daté). Celle-ci voit le jour en 1969 et constitue depuis un élément déterminant du profil de consommation énergétique de la commune. En effet, outre son impact sur la saisonnalité de la consommation, l'activité touristique représente une grande partie de la demande énergétique de la commune, Aussois pouvant accueillir jusqu'à 10 fois plus de touristes que sa population (Savoie-Mont-Blanc, 2014).

---

[3] La soufflerie du complexe ONERA d'Avrieux-Modane (sur la commune d'Avrieux) fut mise en service en 1952.

C'est par ailleurs à cette époque que se réalise l'ouverture d'une nouvelle route reliant Aussois à Modane (D215) qui vient s'ajouter aux routes historiques existantes, la route des forts de l'Esseillon (D215G et D215F) et celle menant à Termignon (D83) (Figure 8).

Afin de reconstituer le métabolisme énergétique actuel d'Aussois, nous avons estimé l'énergie produite localement ainsi que l'énergie finale consommée sur la commune. Cela nous a ensuite permis d'estimer l'énergie primaire et l'énergie finale importée sur le territoire.

Estimation de l'énergie produite localement : bois d'affouage et énergie hydraulique

Le bois est toujours utilisé comme source d'énergie et sa comptabilisation est simple. Selon les enquêtes, 130 ménages bénéficient actuellement de l'affouage à hauteur de 5 m^3 tous les 2 ans, soit environ 1,2 m^3/hab/an.

L'énergie hydraulique joue un rôle structurant sur le territoire. Il s'agit là d'un élément très spécifique et peu commun dont l'évaluation pose problème. En effet, même si deux barrages hydroélectriques sont présents dans le périmètre administratif de la commune, les centrales hydroélectriques se trouvent dans les communes voisines (Figure 4). A ce titre, la définition stricte du territoire en tant que commune inciterait à exclure les centrales de la commune, et donc à ne pas considérer qu'il y a « production » (transformation) d'énergie électrique sur la commune.

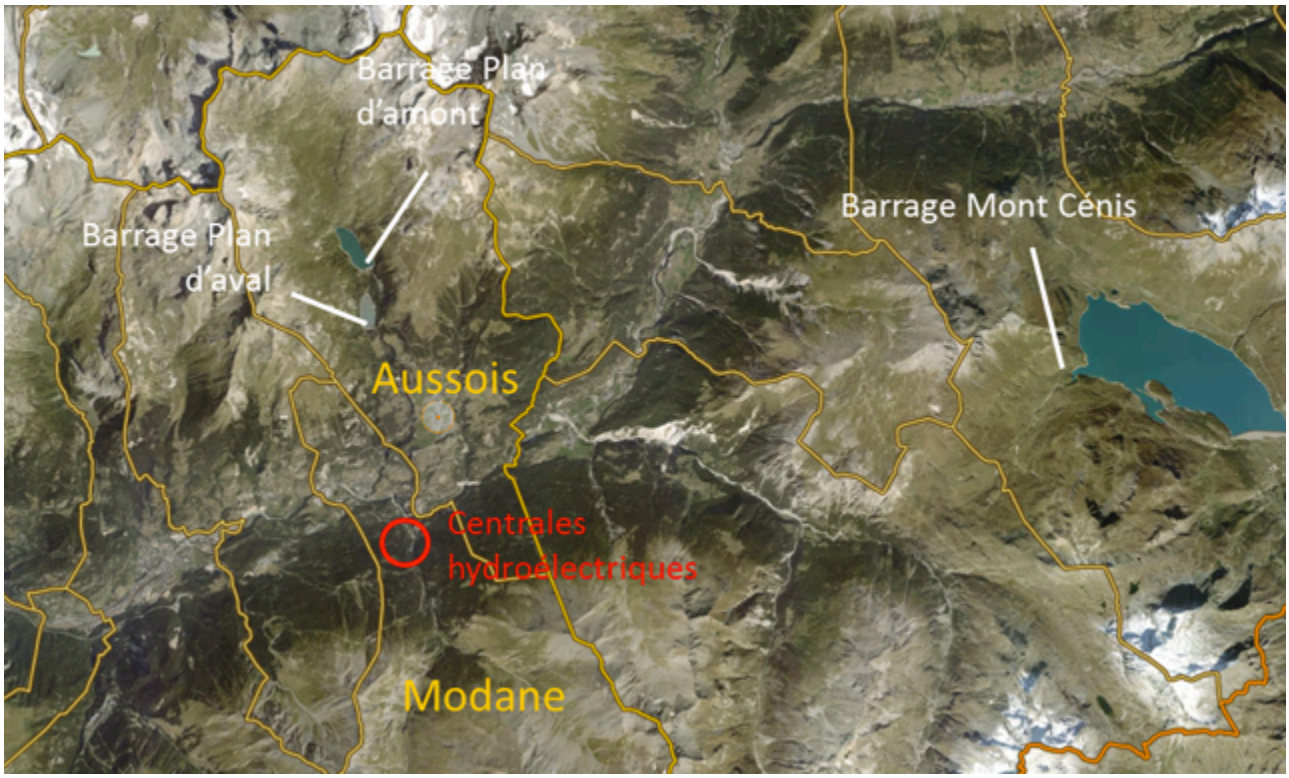
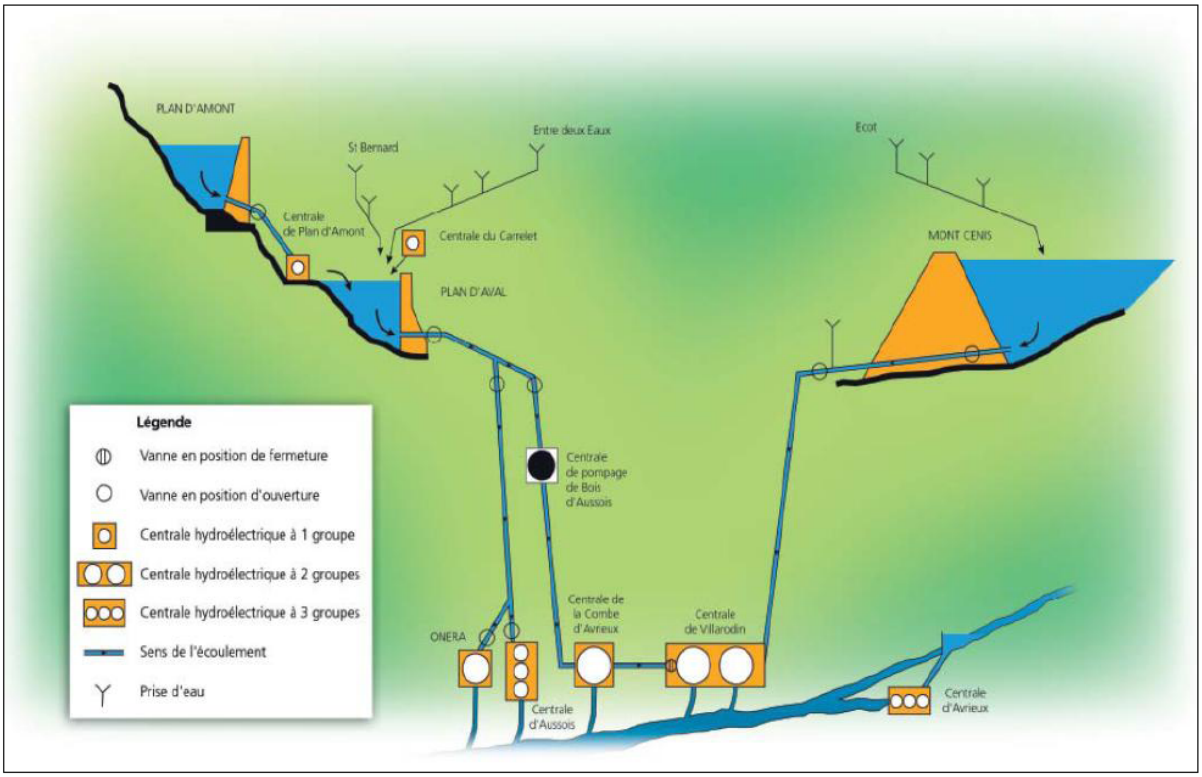


Figure 4 : photographie aérienne et limites géographiques des communes (Géoportail) et position de quelques éléments du réseau de production hydroélectrique.

Si l'on souhaite rester fidèle au territoire administratif communal, la solution alternative pourrait être de prendre en compte l'énergie primaire, c'est-à-dire l'énergie potentielle de l'eau qui tombe dans les limites géographiques de la commune. Mais cette énergie n'est pas directement utilisable. Il est nécessaire de la stocker en barrages réservoirs afin de la canaliser vers des transformateurs. On pourrait donc finalement tenter de calculer l'énergie potentielle

de l'eau stockée dans ces barrages. Toutefois, là encore, l'unité administrative de la commune ne coïncide pas avec le bassin versant qui est l'unité fonctionnelle cohérente en termes de collecte de l'eau. Pour complexifier le tout, le barrage du Mont-Cenis est connecté au barrage Plan d'aval par une centrale de pompage qui permet d'optimiser le niveau d'eau et la production d'électricité au cours des saisons (Figures 5 et 6). Cette eau est ainsi acheminée au barrage de Plan d'aval depuis un bassin versant adjacent situé à l'est du bassin versant sur lequel se trouve la commune d'Aussois.



Source : Document « Aménagement de Villarodin, EDF Unité de Production Alpes »

Figure 5 : Le complexe hydroélectrique de Haute Maurienne. Source : EDF.

Les données nécessaires à une analyse calée sur les définitions présentées plus haut étant difficiles à obtenir, nous avons finalement fait le choix d'inclure dans le métabolisme énergétique d'Aussois, mais sans l'estimer, un flux d'énergie potentielle traversant le territoire. L'énergie potentielle de l'eau des barrages n'a pas pu être calculée avec précision. A titre indicatif, on peut estimer que les centrales hydroélectriques situées aux limites communales d'Aussois (car aucune électricité n'est en réalité produite sur le territoire communal) et de la combe d'Avrieux produisent environ 280 GWh (24 kTep) à partir de l'eau des barrages.

L'absence de production d'électricité sur la commune soulève un problème intéressant de comptabilité. En effet, la municipalité n'en produit pas mais bénéficie largement de la transformation d'énergie électrique dans les centrales en aval de ses limites, grâce à des contrats lui permettant d'obtenir gratuitement une partie de l'électricité qu'elle consomme. Choisir d'exclure la production d'énergie électrique sous prétexte que celle-ci se fait juste à la périphérie des limites communales résulterait en une représentation biaisée du métabolisme énergétique dans le sens où elle ne permettrait pas de saisir les choix socio-économiques faits par les acteurs du territoire. Ces difficultés à caractériser l'approvisionnement en énergie du territoire d'Aussois sur la base des seules limites géographiques sont révélatrices des limites posées par une approche territoriale du métabolisme énergétique.

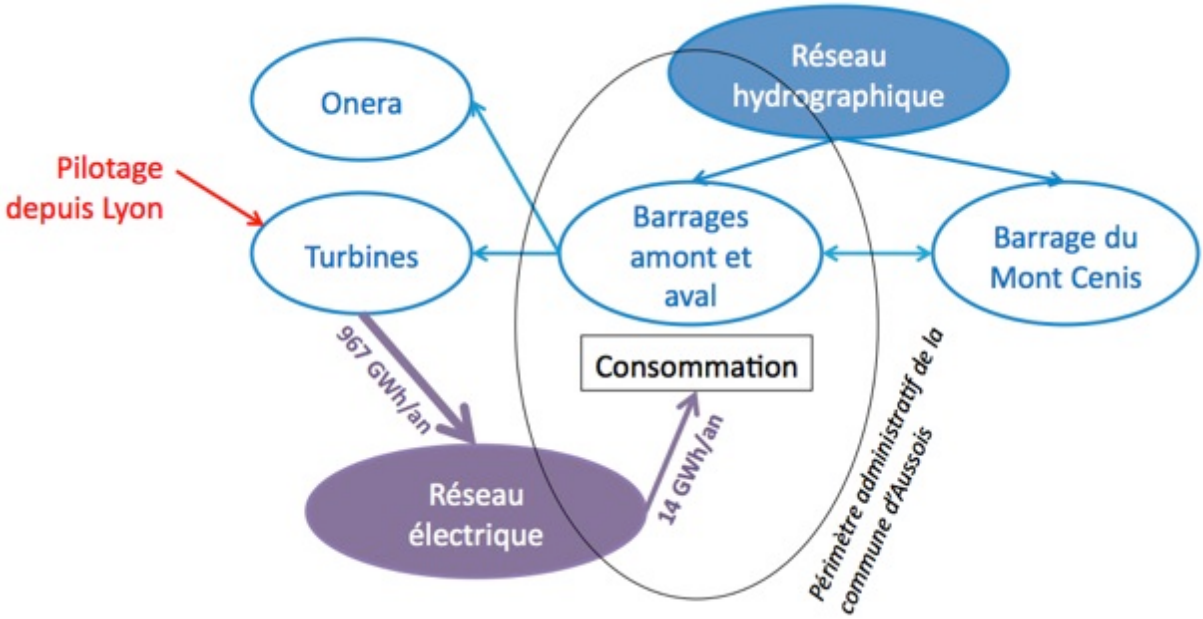


Figure 6 : Représentation fonctionnelle et spatialisée des barrages et de l'électricité à Aussois.

Estimation de l'énergie finale consommée localement

Le bilan énergétique réalisé est basé sur des informations collectées localement ainsi que sur des hypothèses de ratios lorsque les données étaient manquantes. Le tableau 1 présente les mixes d'énergie pour le chauffage selon le type de logement.

Tableau 1 : Mixes énergétiques pour le chauffage selon le type de logement à Aussois (source : enquêtes locales). Le centre Paul Langevin du CNRS est a priori l'unique grand hébergeur à ne pas se chauffer entièrement à l'électricité. Des ratios de besoins de chauffage par m² ont ensuite été utilisés pour calculer les consommations en chauffage par type d'énergie et par type de logement.	Résidences principales	Résidences secondaires	Grands hébergeurs (tourisme)
Electricité	20%	100%	95%

Fioul	25%	/	5%
Bois	55%	/	

Environ la moitié des ménages utilisent uniquement le bois pour se chauffer et complètent leur approvisionnement issu de l'affouage par du bois provenant majoritairement de la basse Maurienne. L'autre moitié utilise le bois d'affouage comme énergie d'appoint à l'électricité ou au fioul.

La collecte des données de consommation électrique a été simplifiée par le fait que la distribution est gérée en régie municipale. Le tableau 2 présente les différents postes de consommation.

Tableau 2 : Consommation d'électricité par secteur.

	Consommation électrique (GWh)	%
Total	14	100%
Station de ski	2	14%
Grands hébergeurs	7	50%
Particuliers	5	36%

La consommation énergétique pour les transports est explicitée dans la suite, en lien avec les problèmes de périmètres posés. Notons simplement que le chiffre de 120 Tep donné ci-dessous représente uniquement la consommation à l'intérieur du périmètre administratif de la commune.

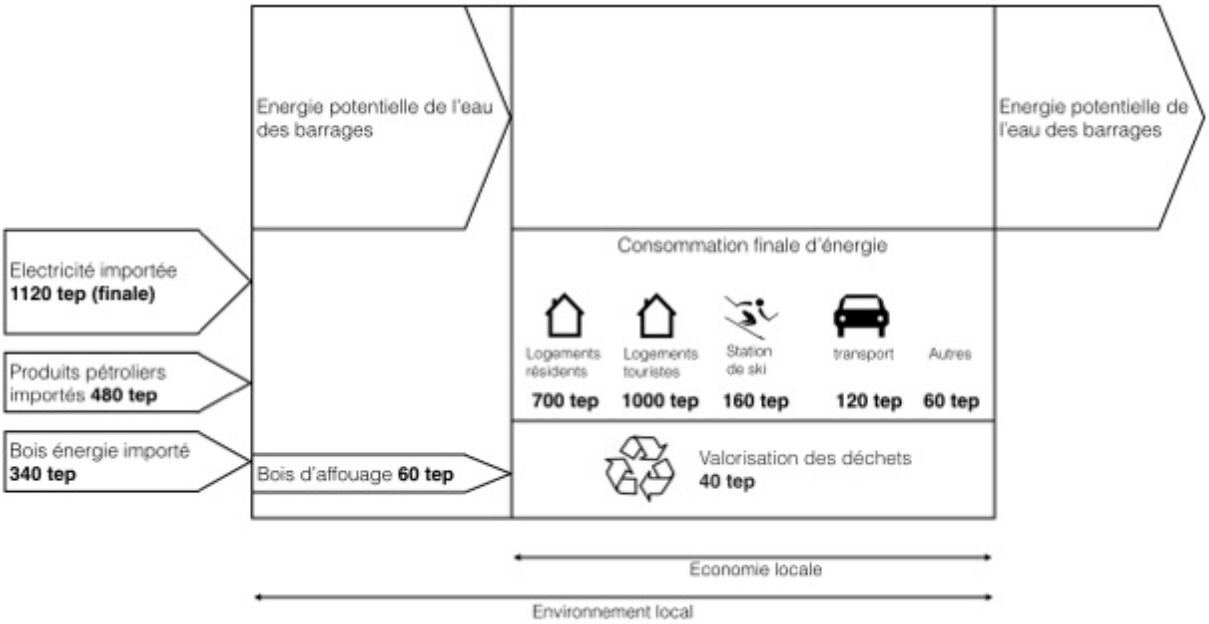


Figure 7 : Estimation des flux d'énergie à Aussois par type d'énergie et secteur de consommation (niveau de comptabilisation n°1).

On voit que le territoire se caractérise par une très forte proportion d'électricité dans sa consommation d'énergie finale : 56% contre environ 25% au niveau national (CGDD, 2014). L'absence de réseau de gaz de ville, mais surtout, la présence du barrage, sont des éléments permettant d'expliquer cette situation. Par ailleurs, l'activité touristique (logements et fonctionnement de la station) apparaît comme le premier poste de consommation, avec 58% du total. Enfin, on peut noter la disproportion entre l'énergie électrique produite à partir de l'eau des barrages d'Aussois (24 kTep environ) et la consommation de la commune (2 kTep).

Il serait par ailleurs possible de calculer l'équivalent primaire des énergies importées. Par convention, un facteur multiplicatif de 2,58 est appliqué à l'électricité pour rendre compte des pertes moyennes de transformation et de transport au niveau national et un facteur 1 est appliqué pour les énergies fossiles et le bois (en pratique, la consommation des raffineries fait que ce facteur devrait être légèrement supérieur, mais l'écart entre les deux reste faible).

L'étude des flux énergétiques permet donc de mettre concrètement en évidence le rôle clé du barrage et de l'activité touristique dans le fonctionnement de la commune.

Un ordre de grandeur de la facture pétrolière du territoire

En faisant l'hypothèse simplificatrice que l'ensemble des produits pétroliers importés sont du fioul, vendu à 0,80€/L et que 1 L de fioul correspond à 10 kWh, la facture pétrolière du territoire s'élève à environ 450 k€, soit près de 650€ par habitant. L'enjeu de la transition énergétique apparaît alors clairement, ne serait-ce que du point de vue de la réduction des flux monétaires quittant le territoire. Le même type de calcul devrait être effectué sur chaque source d'énergie afin d'estimer la facture énergétique du territoire, les données étaient cependant insuffisantes dans notre cas.

Mobilité et questions posées par le calcul infra-territorial

Tout comme pour le calcul de la production d'énergie hydro-électrique, l'une des questions majeures posées par la comptabilisation des flux de la mobilité routière est celle de la définition du périmètre « en deçà » duquel le bilan reste pertinent (cf. supra). A la différence des autres postes considérés, pour les transports cette question concerne évidemment moins la localisation des sources d'énergie fossile utilisée (production) que l'impact des consommations liées aux activités anthropiques au sein du village.
Comme on l'a vu en section 2, dans la méthode AFME la comptabilisation des flux de la mobilité se réalise en limitant le calcul au territoire administratif communal. Au vu des spécificités du territoire d'Aussois, il est pertinent de se demander dans quelle mesure cette information nous permettrait de comprendre la part des transports routiers dans le bilan global de l'énergie finale consommée par l'ensemble de ses acteurs. S'en remettre aux limites imposées par le découpage administratif nous permettrait-il de comprendre l'ampleur effective des dépenses d'énergie fossile pour les déplacements des résidents, touristes et usagers de ce territoire ?
Ces questions apparaissent d'autant plus pertinentes qu'elles concernent, au final, l'ampleur des émissions vers la biosphère/atmosphère des flux de la mobilité engendrés par les acteurs et leurs modes de vie (dégagement de CO2, entre autres). Un mode de calcul basé sur le périmètre administratif de la commune pourrait mener vers une interprétation réductrice des coûts socio-environnementaux associés à ces consommations d'énergie fossile. Ces coûts concernent aussi bien le bien-être de la population que l'équilibre écologique des milieux et

constituent donc des éléments fondamentaux à prendre en compte dans une approche d'écologie territoriale.

D'un point de vue théorique, il serait pertinent d'estimer la consommation d'énergie en distinguant entre déplacements effectués par les résidents et par les touristes, en mode individuel et collectif, et flux liés à la logistique du territoire pendant et hors saison touristique (approvisionnement alimentaire et d'autres produits, collecte des déchets, etc.).
Les données disponibles ne permettent cependant pas une analyse aussi fine. Aucune information sur l'origine géographique des vacanciers, ainsi que sur leurs déplacements d'Aussois vers les domaines skiables à proximité, n'a pu par exemple être repérée pendant la durée de notre étude.
En revanche, nous disposons d'informations sur les lieux de travail des actifs de la commune basées sur des données INSEE RP 2009 et sur une enquête locale, ce qui nous a permis d'estimer les déplacements moyens journaliers domicile-travail (Tableau 3).
Ces données ont ensuite été croisées avec des comptages effectués en 2011 pour les deux principales routes desservant le territoire (Conseil général de la Savoie, 2008 – 2010 – 2011 ; Direction départementale des territoires de Savoie, 2013). Il s'agit des départementales 215 et 83 (Figure 8), reliant Aussois respectivement à Modane (chef-lieu du canton) et à la commune de Sollières – Sardières (station de ski de fond). Nous avons par conséquent adopté une démarche spécifique au territoire de la commune par rapport aux tracés de ces deux artères, qui accueillent les principaux flux en entrée et en sortie d'Aussois [4] .
Le tableau 3 présente la répartition des actifs de la commune selon leur lieu de travail et le tableau 4 résume le nombre des passages et les estimations de consommation d'énergie sur les deux routes principales et à l'intérieur de la commune.

[4] La fréquentation de la route en corniche D 215F reliant Aussois à Avrieux (route des forts de l'Esseillon) est négligeable. Aucune observation n'a donc été réalisée pour cet axe.

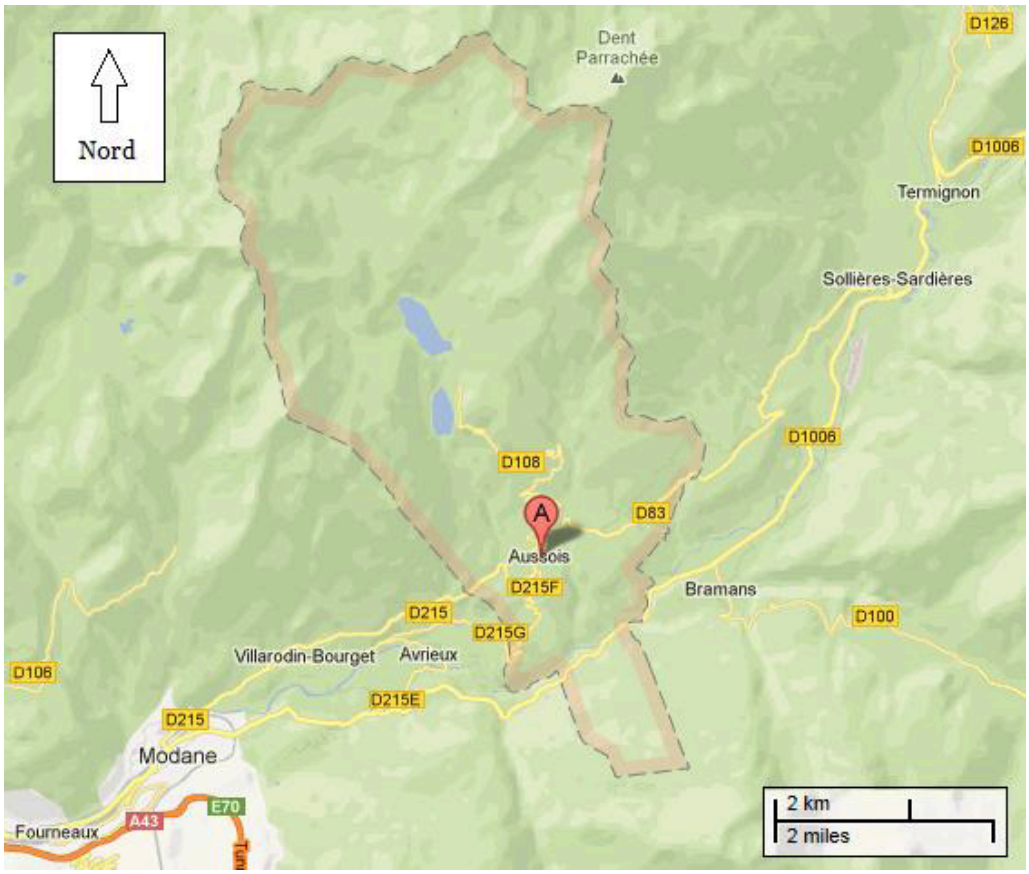


Figure 8. Découpage administratif de la commune d'Aussois et localisation des principaux axes routiers pris en compte dans le bilan des transports (D 215 et D 83).

Tableau 3 : répartition des actifs de la commune selon leur lieu de travail en 2009 (source : INSEE RP 2009 et enquête locale).

	2009	2009 (%)
Ensemble, travaillant à :	366 (80% de l'ensemble des résidents)	100%
Aussois	248	68%
Modane (8 km)	84	23%
Autres dans le département	22	6%
Autres hors département	11	3%

Tableau 4 : Nombre de passages moyens par jour et consommation annuelle pour la mobilité intra et inter-territoires. Dans ce dernier calcul, les transports collectifs à l'intérieur de la commune ont été négligés (environ 0,5 Tep). Les consommations de carburant ont été calculées en considérant le ratio 35% essence -65% diesel. (Source : estimations des auteurs sur la base des données fournis par le Conseil Général de Savoie et Direction Départementale des Territoires de Savoie).

	Route Aussois-Modane (8 km dont 1,9 à l'intérieur d'Aussois)	Route Aussois -Sollières (8,7 km dont 3,1 à l'intérieur d'Aussois)	Flux internes	Total

Passages moyens par jour à l'intérieur des limites administratives d'Aussois (nr/hour)	1518 individuel - domicile-travail : 356 (23,5%) - touristes et autres : 1158 (76,2%) collectif : 4 (0,3%)	463 individuel : - domicile-travail : 90 (19,4 %) - touristes et autres : 370 (80%) collectif : 3 (0,6%)	1185 individuel : - domicile-travail : 243 (20,5%) - touristes et autres : 928 (78,3%) collectif : 14 (1,2%)	3166 individuel : - domicile-travail : 689 (21,7%) - touristes et autres : 2456 (77,6%) collectif : 21 (0,7%)
Consommation d'énergie à l'intérieur des limites administratives d'Aussois (Tep/an)	63 domicile-travail : 14 touristes et autres : 49	31 domicile-travail : 6,2 touristes et autres : 24,8	25 domicile-travail : 5 touristes et autres : 20	119 domicile-travail : 25,2 touristes et autres : 93,8

La plupart des déplacements collectifs et individuels effectués par les touristes aussi bien que par les résidents de la commune pendant l'année se concentrent sur l'axe Aussois-Modane. Une partie de ce flux est générée par les déplacements domicile-travail des résidents d'Aussois travaillant à Modane, majoritairement en mode individuel (environ 23,5% du total). A ceux-ci s'ajoutent les flux routiers vers Modane engendrés par la logistique, la mobilité des inactifs ou des actifs se déplaçant à des fins autres que professionnels (concentration d'établissements scolaires et centres commerciaux dans le chef-lieu), ainsi que les déplacements des touristes, dont le débit est environ 3 fois plus important que celui des déplacements professionnels des résidents (76,2%). Tout comme pour les flux professionnels, la mobilité des touristes s'effectue pour sa grande majorité en mode individuel (véhiculés privés ou taxis). Les transports collectifs vers Modane ne représentent en effet qu'une part mineure de l'ensemble des déplacements (0,2%), et ce aussi bien pour les résidents que pour les vacanciers. Une seule navette « Express » relie les deux communes (Ligne M11 TransDev Savoie, réseau de transport du Conseil Régional). Elle n'est fonctionnelle que pendant la saison touristique et assure la connexion entre la gare de Modane, seul nœud ferroviaire du Canton, et Aussois; certaines courses sont prolongées jusqu'au village de Sardière.
La principale problématique rencontrée dans l'évaluation de ces flux réside dans le fait que seulement 1,9 des 8 km du tracé de la D215 se situe à l'intérieur des frontières administratives d'Aussois (cf. Tableau 4 et figure 8). Si, donc, on se limite à calculer les consommations énergétiques annuelles engendrées par les déplacements Aussois-Modane (tous véhicules confondus) en considérant les kilomètres parcourus « en deçà » des limites administratives du territoire, seulement 62,8 tep/an (dont environ 23% pour les déplacements professionnels) seront directement imputables au territoire, contre 264,5 pour l'ensemble du trajet.

D'une manière plus nuancée, une réflexion du même ordre s'impose pour les flux de la deuxième route prise en compte dans notre analyse, la départementale 83 reliant Aussois à la commune de Sollières – Sardières. Selon le comptage effectué pour l'année 2011, la circulation sur cet axe ne représente qu'environ 30% de celle de la D 215. En plus de la

navette « Express » M11 Modane-Aussois dont, comme nous l'avons vu, certaines courses sont prolongées jusqu'au village de Sardières, la D83 est aussi fréquentée par l'une des lignes ski-bus Haute-Maurienne (ligne 2 TransDev Savoie) qui, en saison touristique, relie Aussois à la commune de Termignon en passant par Sollières et Sardières. La part des transports collectifs par rapport à celle des transports individuels est ici plus importante que sur l'axe Aussois - Modane (0,6%). Comme pour la D215, ce flux reste toutefois minoritaire par rapport au total des transports en mode individuel ; sur la D83, ces derniers sont moins imputables aux déplacements des actifs d'Aussois vers leurs lieux de travail (19,4%) qu'à ceux des touristes se rendant aux stations de ski de fond de Sardières et Sollières ou au domaine skiable de Termignon (80%).
Comme observé pour la D215, si la comptabilisation de l'ensemble de ces flux (individuels et collectifs) se réalise en considérant seulement le tronçon de la D83 compris entre les limites administratives d'Aussois (3,1 sur 8,7 km totaux), la consommation annuelle s'élèvera à 31,3 tep/an, contre 87,7 pour l'ensemble du parcours (Aussois-Sollières).

La même tendance observée dans la comptabilisation des flux en entrée et en sortie du territoire, à savoir la forte prédominance des modes de déplacement individuels aussi bien pour les résidents que les touristes, se retrouve confirmée dans le bilan des flux internes au périmètre du territoire. Environ la moitié des résidents actifs travaillant sur le territoire de la commune se déplacent en véhicule privé. Une consommation de seulement 5,3 tep/an est imputable aux flux internes liés aux déplacements professionnels des résidents, en raison des distances relativement courtes entre lieux de résidence et de travail (1 km en moyenne). Bien que faible par rapport aux consommations totales engendrées par les transports en sortie et en entrée du territoire (94,1 tep/an, au sein de la commune), cette consommation reste pourtant bien plus importante que celle engendrée par les transports collectifs à l'intérieur du village (0,4 tep/an). Ces derniers sont assurés par une navette (Ski Alpin Aussois) utilisée presque exclusivement par les touristes et opérationnelle uniquement en saison hivernale. Comme pour les résidents, les déplacements des touristes sur la commune se réalisent principalement en mode individuel (20,2 tep/an).

En dehors des questions posées par la définition des limites du territoire d'analyse « pertinent », deux tendances majeures se dégagent du bilan des flux de la mobilité routière engendrés par l'organisation socio-spatiale de la commune. En premier lieu, les déplacements des résidents actifs aussi bien que des touristes s'effectuent en grande majorité en mode individuel. En second lieu, comme observé pour les autres types de consommations, la présence de la station de ski a une influence cruciale sur le niveau et l'intensité des consommations d'énergie fossile dues aux transports.

Questions posées par le choix des périmètres : le lien avec les démarches TEPOS

Avec la nécessité de transition énergétique, découlant de la double contrainte d'épuisement des ressources et de changement climatique, a émergé le concept de Territoire à Energie Positive (TEPOS). A l'heure actuelle, en France, plusieurs dizaines de territoires sont engagés dans cette démarche. D'après le projet de loi sur la transition énergétique, *« est dénommé 'territoire à énergie positive' un territoire qui s'engage dans une démarche permettant d'atteindre l'équilibre entre la consommation et la production d'énergie à l'échelle locale en réduisant les besoins d'énergie au maximum »*. De plus, *« un territoire à énergie positive doit favoriser l'efficacité énergétique et viser le déploiement d'énergies renouvelables dans son approvisionnement. »*. Le Réseau Territoires à Energie Positive va même plus loin en

affirmant les objectifs de développement local et de couverture des besoins par 100% d'énergie renouvelable locale.
Dès lors, il convient d'identifier correctement ce qui relève ou non, d'un point de vue comptable, de la production et de la consommation du territoire. Côté consommation, nous avons mis en évidence les différents choix possibles en fonction des questions posées. Il est clair que le même problème se pose du côté de la production.

L'approche la plus simple à mettre en œuvre est sans doute l'approche géographique classique : toute production à l'intérieur des limites du territoire est comptabilisée. En appui à cette approche, nous avons déjà souligné à quel point la présence de grandes installations (hydrauliques, nucléaires…) est un facteur décisif pour expliquer l'évolution de l'économie locale, des rapports sociaux et de l'environnement (notamment par sa composante paysagère).
Comme nous l'avons montré plus haut, le cas d'Aussois est un bon exemple pour constater les limites de cette approche. D'une part, le barrage, qui fournit plus de dix fois ce que la commune consomme, a été financé par l'état et appartient à EDF. D'autre part, on pourrait se demander à partir de quand on considère qu'il y a production d'énergie : si le barrage est bien sur la commune, le turbinage a en effet lieu en dehors du territoire ; quant aux décisions de mise en production, elles se prennent depuis un centre situé à Lyon (Figure 6). Il apparaît donc clairement que cette installation dépasse largement l'échelle d'une commune et qu'il pourrait être inapproprié de comptabiliser sa production dans les « actifs » du bilan communal.

Une option alternative serait de définir le périmètre à prendre en compte à partir de l'analyse des mécanismes de prise de décision : qui est détenteur du pouvoir décisionnaire ? Prenons l'exemple d'unités de production d'électricité. Elles peuvent appartenir à l'Etat (via sa participation majoritaire dans EDF), appartenir à des entreprises privées, à des collectivités territoriales ou encore à des ménages privés. Ainsi, l'autorité administrative et ses habitants – en d'autres termes, le territoire - n'ont réellement de pouvoir décisionnaire que sur les installations dont ils sont propriétaires, ou en tout cas auxquelles ils participent significativement à la gouvernance.
Les projets émergents de régies publiques de production d'énergie renouvelable s'inscrivent dans cette perspective à travers le financement participatif via l'épargne locale. Au contraire, la production des grandes unités publiques et privées ne devrait pas être comptabilisée. Entendu que ces grandes unités tiennent une place décisive dans le bilan énergétique national, il sera cependant indispensable de choisir un critère (par exemple le nombre d'habitants) pour allouer cette production à chaque territoire.

Finalement, ces réflexions amènent à plaider pour une juxtaposition des points de vue adoptés, du côté de la production comme du côté de la consommation : chacun nous renseigne sur un aspect particulier du métabolisme énergétique du territoire et de ses liens d'interdépendance avec le monde extérieur, ils sont donc complémentaires.

4) Vers une vision biophysique de l'énergie circulant sur le territoire

Des méthodes d'analyse relevant d'une vision biophysique de l'énergie - et que l'on pourrait qualifier d'alternatives à l'AFM - suivent de près l'émergence de la notion de métabolisme appliquée aux systèmes urbains. Elle précédent en effet l'élaboration de la méthode AFM et remontent aux années 1970, peu après la parution du travail pionnier de Wolman (1965) aux Etats-Unis.

C'est dans ce contexte scientifique que l'écologie systémique synthétisée par les frères Odum s'attache au développement d'un mode de calcul des flux d'énergie technique et biophysique des villes en équivalent d'énergie solaire (Odum, 1971). Cette méthode portera par la suite à la définition de la notion d'« émergie » (Scienceman, 1987; Odum, 1996). Une unité de mesure unique – solar energy joule (SEJ) – est élaborée et utilisée pour estimer le bilan de différentes formes d'énergie assurant le fonctionnement du système urbain ; elle permet d'harmoniser les résultats du calcul pour les énergies d'origine fossile et renouvelable. L'ambition ultime de la synthèse émergétique est de fonder une nouvelle méthode d'analyse intégrant les sous-systèmes économique et environnemental par le recours à des valeurs biophysiques « universelles ».
Rappelons que c'est proprement à partir de cette méthode que Zucchetto (1975) réalise le bilan du métabolisme énergétique de la ville de Miami des années 1950 jusqu'au début des 1970. Bien que surpassée par la diffusion de la méthode AFM en les années 1990 (de nos jours majoritairement utilisée) l'analyse émergétique est également à la base de travaux plus récents. Citons à titre d'exemple l'étude du métabolisme de Taipei, avec 2 mises à jour (Huang, 1998; Huang et Hsu, 2003, Huang et Chen's, 2009) et une plus récente étude sur Pékin (Zhang *et al*., 2009 et 2011).
Les principales critiques adressées à cette méthode concernent non seulement le mode de calcul de la synthèse émergetique, mais aussi l'ensemble du cadre théorique formulé (valeurs biophysiques) et son incompatibilité avec certaines notions clés de la thermodynamique (exergie et enthalpie) (Hau et Bakshi, 2004). Ces critiques renvoient à une remise en cause de l'analogie stricte entre systèmes économiques et écosystèmes (Ayres, 2000). Notons que, dans d'autres contextes, cette même question a été également soulevée pour les AFM, du moment où elles se fondent sur une application de la métaphore Odumienne « ecosystem-as-superorganism » aux systèmes urbains (Golubiewski 2012).
Au-delà du scepticisme rencontré, la synthèse émergétique, tout comme la méthode AFME qui comptabilise les flux de biomasse non utilisés à des fins de production d'énergie technique, sont porteuses d'un point de vue complémentaire aux modes de calcul se limitant aux flux d'énergie pour le fonctionnement technique du territoire (cf. section 2). Du fait d'intégrer flux d'énergie technique et biophysique, ces méthodes posent les bases pour introduire les services écosystémiques fournis par les espaces naturels dans le cadre analytique du métabolisme énergétique des milieux urbanisés. Dans le cas de notre étude, ceci ouvre à une nouvelle conceptualisation non seulement des différentes formes d'énergie en circulation dans le territoire d'Aussois, mais aussi des échanges énergétiques entre différents types d'espace de la commune en fonction de leur fonctionnement biophysique.

Vision énergétique du territoire physique

L'approvisionnement en énergie de la commune d'Aussois repose majoritairement sur les réseaux plus ou moins étendus analysés précédemment. Ces apports d'énergie sont actuellement largement responsables de la différentiation spatiale à l'intérieur de la commune. L'objectif de cette section consiste à proposer une description des flux énergétiques échangés au sein de la commune contribuant à cette différentiation.

Les différentes activités et modes d'occupation des sols peuvent en effet être classés en deux grandes catégories d'espaces à fonctionnement biophysique distinct. La première inclurait les zones à caractère majoritairement autotrophe (photosynthèse > respiration) et la seconde celles à caractère majoritairement hétérotrophe (photosynthèse < respiration). En termes énergétiques, le rapport entre autotrophie et hétérotrophie au sein d'un territoire permet d'appréhender son degré théorique d'autonomie énergétique. Pourtant, l'objectif ici n'est pas

tant de déterminer en détail la valeur de ce rapport mais d'illustrer la nature des flux d'énergie assurant l'entretien et les interconnexions entre espaces hétérogènes. Nous donnons des ordres de grandeur à partir des estimations, enquêtes de terrain et données statistiques disponibles. La figure 9 illustre le résultat de cette analyse. Tous les flux y sont exprimés en GWh/an. Le flux incident d'énergie solaire, calculé sur la base d'une puissance moyenne de 160 W/m^2/an valable pour Aussois, y figure en GWh par type d'espace afin de mettre en perspective les flux énergétiques relevant des activités humaines.

Nous distinguons quatre principaux types d'espaces au sein du territoire communal: (i) espaces artificialisés, (ii) espaces agricoles, (iii) bassins versants forestiers exploités et barrage-réservoir (iv) espaces naturels divers. Cette dernière catégorie recouvre tout espace peu ou pas aménagé par l'homme et dont l'apport pour la société prend notamment la forme de services écosystémiques. La superficie en hectares de chaque type d'espace est donnée entre parenthèses dans la figure 9. Faute de données disponibles, les catégories « bassins versants exploités » et « espaces naturels » sont comptabilisées ensemble.

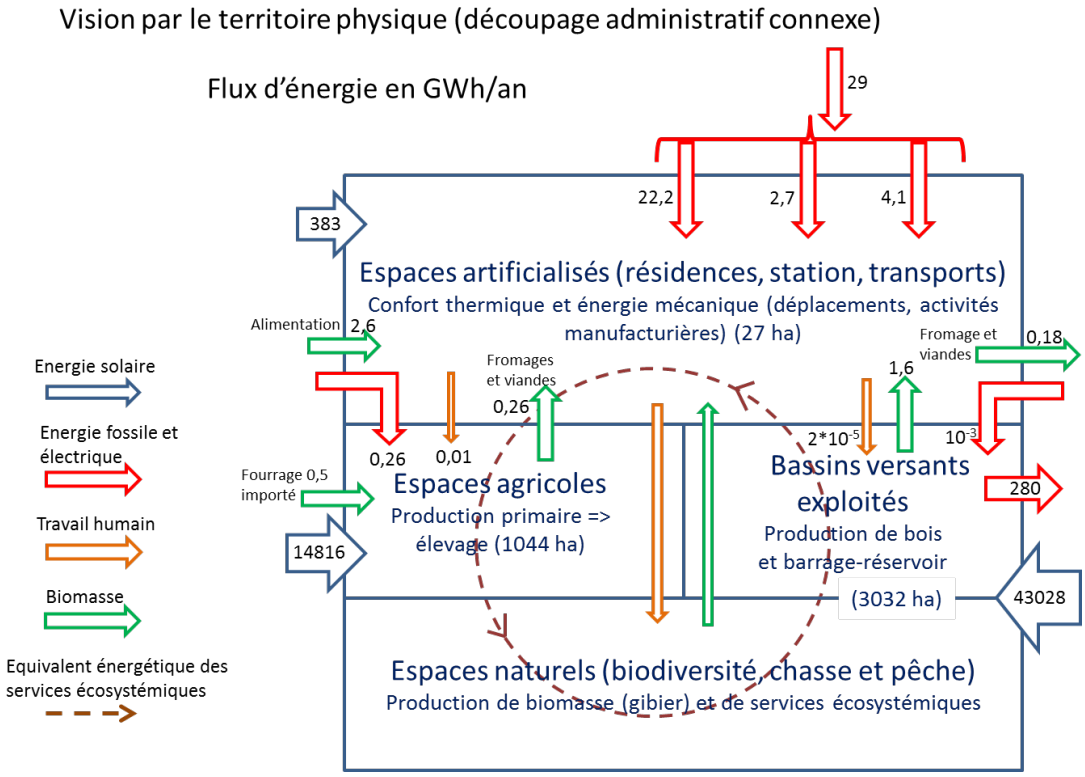


Figure 9 : Types d'espace et flux d'énergie (GWh/an) dans la commune d'Aussois.

Les espaces artificialisés incluent actuellement en particulier les zones résidentielles, le réseau de transport routier et la station de ski. Leurs consommations dépendent notamment du confort thermique recherché et de l'énergie mécanique mise en œuvre et constituent par là des « hot-spots » énergétiques dans leur contexte géographique. Les consommations d'énergie fossile et électrique des espaces artificialisés calculées par poste de consommation dans les sections précédentes sont ici données en GWh/an. Les flux énergétiques échangés entre les espaces artificialisés et les autres espaces communaux sont notamment de la biomasse alimentaire et du bois de chauffe en ce qui concerne les flux entrants et du travail humain pour l'agriculture et la foresterie en ce qui concerne les flux sortants. L'apport de bois de chauffe est d'environ 2,5 m^3/ménage/an (soit 736 m^3 de bois pour l'ensemble de la commune), ce qui vaut en énergie 1,6 GWh/an. L'apport d'énergie alimentaire provenant de l'extérieur est estimé à ~2,6 GWh/an sur la base d'une consommation de 2500 Kcal/hab/jour

pour la somme de la population permanente (677 hab * 365 jours) et la somme des vacanciers amenés à une moyenne journalière (~1800 * 365 jours).
Actuellement, l'agriculture communale est surtout dédiée à la production de fromage, notamment de Beaufort et dans une moindre mesure de viande bovine, ovine et caprine. Les cheptels se composent notamment de vaches (110 têtes pour une production annuelle de lait de 260 m^3) et d'ovins et de caprins comptant respectivement environ 700 et 40 têtes, soit un ensemble de 190 Unités Gros Bétail (UGB). Nous avons ainsi pu estimer le produit énergétique de cette agriculture animale à 0,21 GWh pour la production laitière (teneur en énergie du lait ~700 Kcal/lt) et à 0,04 GWh/an pour la production de viande, soit une production annuelle de carcasse de 11 tonnes. Cette production est obtenue en considérant des poids vifs de 500 et 50 kg respectivement pour les bovins, ovins et caprins, un taux moyen de renouvellement des cheptels de cinq ans et une teneur en énergie de la carcasse de 3300 Kcal/kg.
A la lumière de ces calculs, le bilan énergétique entre production et consommation alimentaire locale de la commune est égal à 1/10, ce qui correspond à un déficit énergétique théorique lourd pour le secteur agroalimentaire local.

La production d'énergie alimentaire engendre aussi une consommation énergétique. L'enquête menée sur les pratiques agricoles a permis d'estimer, ne serait-ce que grossièrement, la consommation énergétique de l'élevage aussoyen. Le système est peu mécanisé, bien spécialisé et extensif. Les surfaces nourricières des animaux au sein de la commune sont exclusivement composées des prairies permanentes (~1000 ha) et temporaires (~30 ha) dont la majorité (~70 %, soit 700 ha) sont des alpages s'ouvrant au pâturage entre les mois de juin et septembre. Hors alpages, les prairies sont régulièrement irriguées par un système d'aspersion alimenté par écoulement gravitaire, donc sans consommation énergétique, par le barrage-réservoir du Mont d'Amont. L'utilisation de l'eau d'irrigation est juste conditionnée par la gestion intégrée des barrages-réservoirs entre usages agricoles et énergétiques.
La fertilisation des prairies est principalement assurée par un mix de fixation biologique d'azote et d'épandage des déjections animales. Contrairement aux alpages, les prés bas (~275 ha) reçoivent aussi de l'azote minéral en complément. Le produit moyen des prairies est de l'ordre de 2 tonnes de matière sèche par hectare et par an, soit environ 50 kg N/ha/an (~7 MWh/ha/an). Le coût énergétique de la fertilisation peut être approché à partir de l'apport total d'azote minéral et du coût énergétique unitaire de fabrication de l'engrais. La consommation typique de l'industrie actuelle des engrais est de l'ordre de 50 GJ/tonne de N. L'apport total d'azote minéral pour la commune serait de l'ordre de 10 tonnes/an (275 ha * 40 kgN/ha). La fixation biologique et l'épandage apporte encore 50 kg N/ha/an alors que les pertes sont estimées à 30 kg N/ha. La consommation d'énergie pour la fabrication de l'engrais minéral (~30 % de la fertilisation totale) s'élève ainsi à 0,15 GWh/an.
Par ailleurs, les exploitations sont équipées d'un ou deux tracteurs qu'elles se partagent pour assurer le transport des matières agricoles. Sur la base de l'étendue agricole de la commune (~1000 ha) et étant donné que les terres ne sont pas labourées, on a estimé la consommation de carburant des tracteurs à ~0,1 GWh. Ce calcul admet un passage par an sur les 1000 ha et des trajets autres, équivalents à 1/5 de cette surface, pour une consommation unitaire de 10 lt/ha. Ces deux principales consommations directes et indirectes de l'agriculture aussoyenne (tracteurs et engrais minéral) somment à 0,25 GWh/an et fournissent environ 7,3 GWh/an sous forme de fourrage.
Les rations animales sont par ailleurs complétées par des aliments composés, importés de l'extérieur. Ces aliments couvrent environ 7 % des besoins fourragers du bétail, soit 0,5

GWh/an. Somme faite des fourrages local et importé, l'efficacité énergétique de l'élevage (conversion des calories du fourrage en viande et en lait) est égale à 3%.

Les aliments importés se composent surtout de céréales et de tourteaux, résidus de l'extraction de l'huile des graines oléagineuses. Etant donné que ces aliments (céréales et graines oléagineuses) sont issus d'agrosystèmes à priori plus intensifs en intrants que les prairies, le coût énergétique de leur production sera proportionnellement plus élevé que pour l'herbe. Nous avons fait l'hypothèse que le rapport des coûts est de l'ordre de trois, et que par conséquent, la part des aliments composés dans la ration du bétail (7 %) correspondrait à 20 % de l'énergie totale dépensée pour produire la ration. Tout cela donne un total d'énergie dépensée dans l'agriculture de 0,30 GWh/an. Nous ajoutons à ce total l'énergie correspondant au travail humain. Nous avons considéré que les 17 agriculteurs de la commune fournissent chacun une puissance de 0,5 kW (puissance correspondant à une bonne paire de jambes) sur une durée de travail de 8h/jour sur 180 jours/an, soit une énergie totale de l'ordre de 0,01 GWh/an, quantité bien faible par rapport au travail mécanique. Tout en gardant à l'esprit que ce calcul énergétique sur l'agriculture locale ne fournit qu'un ordre de grandeur, nous obtenons un rapport d'énergie produite à l'énergie investie (Energy Return On Investment – EROI) de l'ordre de 0,8. Ce bilan signifie que ce système spécialisé et extensif d'élevage montagnard fournit un peu moins d'énergie qu'il n'en consomme.

Un aspect intéressant qui échappe à la comptabilité énergétique développée plus haut est que cette agriculture peu mécanisée produit aussi du paysage. En effet, les animaux de la commune assurent la triple fonction de production de lait, de viande et d'entretien des prairies, faisant ainsi de la cogénération de nourriture et de paysage, deux sources essentielles de revenu pour la commune. Ainsi, une grande partie des calories autrement « perdues » du fourrage (partie non converties en biomasse) sont valorisées dans une production supplémentaire de richesses.

Concernant les espaces forestiers, la coupe et le transport du bois nécessitent également un investissement en énergie. L'estimation de cette consommation est faite sur la base d'hypothèses pour le transport et la coupe de bois. Nous admettons le déploiement d'une puissance mécanique de 200 kW pour le transport du bois (ordre de grandeur d'un camion benne ou tracteur à remorque de 25 m^3) et de 2,5 kW pour la coupe (ordre de grandeur d'une tronçonneuse). Si l'on admet qu'en une heure de fonctionnement continu d'une tronçonneuse on obtient 20 m^3 de bois découpé et que le transport du bois se fait sur une distance de 5 km à une vitesse de 30 km/h, la collecte des 736 m^3 de bois par an correspondrait à une consommation énergétique de 10^{-4} GWh pour la coupe/découpe et de 10^{-3} GWh pour le transport (l'énergie pour le chargement de ce bois en considérant une élévation de la masse totale sur quelques mètres du sol est négligeable, ~10^{-5} GWh). Le travail musculaire humain à hauteur de 0,5 kW sur la durée de l'opération est aussi négligeable (~10^{-5} GWh). Enfin, étant donné le contenu énergétique du bois collecté annuellement (1,6 GWh), l'EROI de l'opération serait de l'ordre de 1300, soit plus de 1500 fois supérieur à celui calculé pour l'élevage.

Quant à la chasse, nous pouvons faire l'hypothèse que le travail humain impliqué est aussi proportionnel à la puissance fournie par les jambes humaines (0,5 kW). Une journée de chasse (8 h) sans recours à des moyens mécanisés correspondrait ainsi à une énergie équivalente à environ un kilogramme de gibier (pour une densité énergétique du gibier de 3300 kcal/kg). C'est-à-dire qu'une opération de chasse fournissant 10 kg de gibier sur huit heures de travail musculaire intense serait couronnée d'un EROI de l'ordre de 10.

Le tableau 5 ci-dessous récapitule les ordres de grandeur des principaux flux énergétiques calculés pour l'agriculture et la foresterie.

Tableau 5 : Fonctionnement énergétique des espaces agricoles et forestiers exploités

	Production locale (GWh/an)		Fourrages importés (GWh/an)	Taux de conversion d'énergie de l'élevage	Consommation (GWh/an)		EROI
	végétale	viande/lait			Engrais	Machines et main-d'œuvre	
Agriculture	7	0,26	0,5	3 %	1,5	0,12	0,8
Foresterie	1,6	-	-	-	-	0,012	1300

Par opposition à ces calculs énergétiques relevant de l'activité humaine, l'estimation de l'équivalent énergétique des services écosystémiques est beaucoup moins tangible. Les écosystèmes naturels sont par définition des milieux où l'homme n'investit pas d'énergie. Pour autant, à travers les cycles biogéochimiques et l'activité de la biodiversité, ces milieux assurent des fonctions et fournissent des services de valeur inestimable pour la société humaine, comme la production d'oxygène, d'eau, de fertilité, la pollinisation, la régulation climatique de même qu'ils attirent du tourisme. Leur contribution à la production locale de richesses est donc absolument essentielle et incontournable bien que ces milieux soient pour l'essentiel extérieurs au système économique. La flèche en boucle de la figure 9 symbolise cette circulation de richesses non monétisées au sein du territoire.

Pour autant, la contribution de ces espaces à la production de richesses ne se fait pas toujours dans la douceur. Le travail de terrain a permis de mettre en évidence l'existence des conflits entre les activités économiques locales et la protection des espaces naturels, réglementée en grande partie par la charte du Parc Naturel de la Vanoise. Par exemple, la réglementation du parc empêche l'aménagement des pistes pour faciliter l'accès aux alpages en tracteurs, ce qui complique le travail des agriculteurs et risque de priver à terme le bétail d'une partie de sa surface nourricière locale. Cela serait susceptible de conduire à l'augmentation de la part importée de l'alimentation animale. Une autre source de conflit pour les agriculteurs est la présence du loup dont la sanctuarisation par le règlement du parc interdit formellement l'emploi du fusil pour protéger les cheptels. Le conflit résulte alors de la perte économique engendrée par les pertes de cheptel lors d'attaques de loups.

Enfin, la comparaison entre les flux énergétiques relevant de l'activité humaine pour chaque type d'espace et le flux de rayonnement solaire incident correspondant permet de prendre la mesure de l'intensité énergétique de chaque espace. En effet, sans surprise, nous remarquons que le flux solaire est supérieur aux flux anthropiques dans tous les espaces mais que le rapport entre les deux est radicalement différent en fonction de la nature des espaces. Pour les espaces artificialisés, où l'impératif de confort thermique revient à entretenir un climat artificiel sur des étendues relativement grandes, la différence entre soleil et énergies techniques est seulement d'un ordre de grandeur. Pour les espaces agricoles cette différence est de cinq à six ordres de grandeur du fait à la fois de la faible efficacité de conversion d'énergie inhérente à la biologie végétale et animale et de l'exploitation peu intensive de ces espaces. Dans le cas des bassins versants exploités, la différence est de cinq ordres de

grandeur en ce qui concerne le bois et de seulement deux ordres de grandeur si l'on comptait la production d'hydroélectricité. Pourtant, la majeure partie de cette dernière s'appuie sur de l'eau provenant de l'extérieur de la commune et ne peut donc pas être confrontée en bilan au flux solaire entrant.

Mise en perspective historique des consommations énergétiques actuelles.

La transition sociotechnique de la seconde moitié du XXe siècle a opéré un changement structurel sur les consommations énergétiques des différents secteurs. Dans le cas de l'agriculture, le tracteur a remplacé le mulet en tant que dispositif de labour et de transport des matières agricoles. Plus généralement, l'ensemble du domaine de transport a basculé de l'agriculture aux carburants fossiles comme source d'énergie, modifiant ainsi le statut de l'agriculture dans l'approvisionnement de la société et les choix des cultures. L'agriculture communale a pu se spécialiser dans l'élevage en perdant sa fonction nourricière pour la population locale. Elle s'est par conséquent davantage ouverte aux circuits agroalimentaires extérieurs à la fois pour la commercialisation des produits locaux et pour l'importation des aliments de première nécessité qui ne sont plus produits localement.
La consommation du secteur résidentiel a également beaucoup évolué. Les résidences touristiques étant pratiquement absentes avant les années 1960, la consommation totale se résumait à celle des habitants permanents. D'après les témoignages des anciens du village, la quantité annuelle de bois exploitée par habitant était au début du siècle similaire à celle d'aujourd'hui, malgré l'absence des autres sources d'énergie utilisées actuellement, comme l'électricité et le fioul. Toutes les consommations du foyer reposaient alors sur le bois qui devait par conséquent être économisé pour suffire.

Trois facteurs d'économie ont pu être identifiés. Le premier est la taille des ménages. Actuellement, d'après l'INSEE, la taille moyenne des ménages à Aussois est de 2,3 personnes. Dans les récits des anciens du village, cette moyenne se situait à quatre personnes jusqu'aux années 1950. Plus la densité d'habitants est élevée, plus le flux énergétique pour le chauffage est mutualisé. Un deuxième facteur crucial est la part chauffée du foyer. Jusqu'aux années 1950, la régulation thermique n'était pas diffusée à toutes les pièces des habitations. En journée, les occupants se réunissaient dans les deux seules pièces chauffées : la salle à vivre et la cuisine. La nuit, les basses températures des chambres à coucher les obligeaient à s'abriter sous des couvertures avec leurs animaux de compagnie dont la chaleur corporelle faisait office de radiateurs. Le troisième facteur d'économie du bois consistait à mutualiser le flux de chaleur émis par les animaux d'élevage parqués dans les étables situées traditionnellement en dessous des habitations. La récupération de ce flux de chaleur métabolique revenait à valoriser une partie des calories des prairies ingérées et rejetées, par le métabolisme animal dans le chauffage résidentiel.

Références :

Veyret P. et Veyret G., (1970). « Cent ans de houille blanche, cent ans d'économie alpestre », *Revue de géographie alpine*, vol. 581, n°5, p. 49, http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rga_0035-1121_1970_num_58_1_3457?_Prescripts_Search_tabs1=standard&

Destination Haute-Maurienne, « Le village d'Aussois », http://www.destination-haute-maurienne.com/fr/station-aussois.html, non daté (consulté en octobre 2015)

Savoie-Mont-Blanc, « La capacité d'accueil touristique en Savoie-Mont-Blanc - Les données détaillées par commune », http://pro.savoie-mont-blanc.com/Observatoire/Nos-donnees-brutes/Capacites-d-accueil, 2014 (consulté en octobre 2015)

EDF, « Aménagements de Plan d'Amont - Plan d'Aval (73) », http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Hydraulique/Centres/Les_Alpes/publications/documents/fiche_amenag_plan_amont_aval.pdf, 2014 (consulté en octobre 2015)

CGDD, Bilan énergétique de la France pour 2013, Collection Références, 2014.

Arrif T., Blanc N. et Clergeau P., « Trame verte urbaine, un rapport Nature – Urbain entre géographie et écologie », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 574, 2011.

Bringezu S., Fischer-Kowalski M., Kleijn R. et Palm V. (éds.), *Regional and national materials flow accounting: From paradigm to practice of sustainability.* Proceedings of the ConAccount Workshop 21-23 January 1997, Leiden, Wuppertal Special 4. Wuppertal Institute, 1997.

Eurostat (2001). "Economy wide material flow accounts and balances with derived resource use indicators: A methodological guide", Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, p. 92.

Ngo N.S. et Pataki D.E., "The energy and mass balance of Los Angeles County", Urban Ecosystems, Février 2008, vol. 11 pp. 121-139.

Krausmann F. et Haberl H., « The process of industrialization from the perspective of energetic metabolism. Socioeconomic energy flows in Austria 1830–1995", *Ecol Econom,* vol. 41, n°2, 2002, pp. 177–201.

Fischer-Kowalski M. et Haberl H. (éds), *Socioecological transitions and global change: trajectories of social metabolism and land use*, Cheltenham/Northampton, Edward Elgar Publishing, collection Advances in Ecological Economics, 2007.

Schandl H. et Schulz N. B., "Changes in United Kingdom0s natural relations in terms of society's metabolism and land use from 1850 to the present day", *Ecol Econom*, vol. 41, n°2, 2002, pp. 203–221.

Kim E. et Barles S., “The energy consumption of Paris and its supply areas from the eighteenth century to the present”, *Reg Env Change*, n°12, 2012, pp. 295-310.

Kim E., *Les transitions énergétiques urbaines du XIXe au XXIe siècle : de la biomasse aux combustibles fossiles et fissiles à Paris (France),* Laboratoire Géographies-Cités Université Paris I Panthéon-Sorbonne, 2013.

Millennium Ecosystem Assessment, *Ecosystem and Human Well-being: Synthesis*, Washington, D.C., World Resources Institute, 2005, p. 137.

Chevassus-au-Louis B., Salles J.-M., Bielsa S., Richard D., Martin G., et Pujol. J.-L., *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique*, Paris, Centre d'Analyse Stratégique, 2009.

Ayres, R.U., « Ecology vs. Economics: Confusing Production and Consumption ». Center for the Management of Environmental Resources, INSEAD, Fontainebleau, France, 1998.

Barrett G. W., “Closing the Ecological Cycle: The Emergence of Integrative Science”, *Ecosystem Health*, vol. 7, n°2, 2001, pp. 79-84.

Brullot S., Maillefert M. et Joubert J., « Stratégies d’acteurs et gouvernance des démarches d’écologie industrielle et territoriale », *Développement durable et territoires*, vol. 5, n°1, 2014.

Conseil général de la Savoie (Années 2008 – 2010 – 2011), « Bilans des trafics et circulation hivernale 2008, 2010, 2011 », téléchargeables sur http://www.cg73.fr/aides-et-service-fiche/id_aide/437/profil/14/2758-infos-pratiques.htmv

Direction départementale des territoires de Savoie (Actualisation 2013), Observatoire des Territoire de la Savoie, Aussois (73023), p. 15, téléchargeable sur http://www.observatoire.savoie.equipement-agriculture.gouv.fr/Communes/bdsavoie.php?INSEE=73023

Golubiewski N., “Is There a Metabolism of an Urban Ecosystem? An Ecological Critique”, *AMBIO*, n°41, 2012, pp. 751–764.

Haberl H., (2001). “The Energetic Metabolism of Societies. Part I: Accounting Concepts”, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 5, n°1, pp. 11-33.

Hammer M., Giljum S., Bargigli S. et Hinterberger F., “Material Flow Analysis on the Regional Level: Questions, Problems, Solutions”, *NEDS Working Paper*, n°2, avril 2003, Hamburg.

Holmes T. et Pincetl S., *Urban Metabolism Literature Review.* Center for Sustainable Urban Systems UCLA Institute of the Environment, 2012. http://www.environment.ucla.edu/media/files/Urban-Metabolism-Literature-Review2012-44-fea.pdf (consulté en octobre 2015)

Hau J. L. et Bakshi B. R., « Promise and problems of emergy analysis”, *Ecological Modelling*, vol. 178, n°1-2, 2004, pp. 215-225.

Huang S. L., “Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis”, *Journal of Environmental Management*, n°52, 1998, pp. 39-51.

Huang S. L. et Hsu W. L., « Materials flow analysis and energy evaluation of Taipei’s urban construction”, Landscape and Urban Planning*,* vol. 63, n°2, 2003, pp. 61-74.

Huang S. L. et Chen C. W., “Urbanization and Socioeconomic Metabolism in Taipei”, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 13, n°1, 2009, pp. 75-93.

Odum H. T., *Environment, Power and Society*, New York, John Wiley, 1971.

Odum H. T., *Environmental Accounting, Emergy and Decision Making*, New York, John Wiley, 1996.

Pincetl S., Bunjeb P. et Holmes T., « An expanded urban metabolism method: Toward a systems approach for assessing urban energy processes and causes”, *Landscape and Urban Planning*, n°107, 2012, pp. 193– 202.

Scienceman, D., “Energy and eMergy”, in G. Pillet and T. Murota (eds), Environmental Economics - The Analysis of a Major Interface, Leimgruber, Geneva, 1987, pp. 257-276

Zhang Y., Yang Z. et Yu X., « Evaluation of urban metabolism based on emergy synthesis: A case study for Beijing (China)”, *Ecological Modelling*, vol. 220, n°13-14, 2009, pp. 1690-1696.

Zhang Y., Yang Z., Liu G. et Yu X., “Emergy analysis of the urban metabolism of Beijing”, *Ecological Modelling*, vol. 222, n°14, 2011, pp. 2377-2384.

Zucchetto J., “Energy, economic theory and mathematical models for combining the systems of man and nature. Case study, the urban region of Miami”, *Ecological Modelling,* n°1, 1975, pp. 241-268.