



ATELIER PARISIEN D'URBANISME - 17, BD MORLAND - 75004 PARIS - TÉL : 01 42 71 28 14 - FAX : 01 42 76 24 05 - <http://www.apur.org>

LES RÉSEAUX DE CHALEUR À PARIS ET EN PETITE COURONNE

Novembre 2006

INTRODUCTION

En signant et en ratifiant le protocole de Kyoto, la France s'est engagée vis-à-vis de la communauté internationale à retrouver d'ici 2008-2012 ses émissions de gaz à effet de serre de 1990. Contenir la dérive climatique supposera d'aller au-delà, une division par 2 des émissions mondiales est l'ordre de grandeur minimal à atteindre, ce qui se traduit dans un pays comme le nôtre par une division par 4 (si on admet que l'effort à partager est le même pour tous). Par la voix de son premier ministre en 2003, la France s'est engagée à satisfaire cet objectif d'ici 2050.

Dans cette quête de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les réseaux de chaleur ont-ils un rôle à jouer ?

L'étude de l'APUR, réalisée pour le compte de la Région Ile-de-France, s'attache à apporter des éléments de réponse. La question des réseaux de chaleur est abordée de façon très évasive par le Plan Climat 2004 (censé remettre notre pays dans le droit chemin de ses objectifs de Kyoto), sans réel chiffrage. Il existe un vrai déficit d'information sur l'implication des réseaux dans les émissions de gaz à effet de serre, et les éventuels gains à attendre de leur développement. D'ailleurs la bibliographie de cette étude en témoigne, hormis les publications des fédérations de professionnels, il n'existe quasiment rien sur la question.

L'étude de l'APUR se borne à un territoire restreint (Paris et sa petite couronne) et tente de faire un diagnostic des émissions engendrées par les réseaux. L'analyse porte sur les énergies utilisées par les réseaux et établit une comparaison avec les solutions de chauffage individuelles.

On a construit des réseaux dans notre pays depuis le début du siècle pour répondre à des objectifs de nature complètement différente. Au début du siècle, on crée des réseaux pour lutter contre l'insalubrité ; les chaudières d'immeubles sont peu fiables, mal entretenues, les gens brûlent dans les appartements tout et n'importe quoi pour se chauffer. L'idée de délocaliser les lieux de production de la chaleur de leur lieu de consommation permet lutter efficacement contre les cas d'incendies, d'asphyxies et réduit les problèmes liés à l'enlèvement des mâchefers¹ en centre-ville [1]. Après la guerre, l'urbanisation doit faire face à des besoins massifs de chaleur, on continue le développement des réseaux, ces derniers utiliseront les moyens traditionnels (fioul, charbon), mais aussi la chaleur de l'incinération des ordures ménagères. Enfin, la dernière période correspond au choc pétrolier de 1974. L'État ressent l'impératif besoin de désengager son économie de la dépendance du pétrole. La production d'électricité est concernée, on se lance dans le programme électronucléaire ; la production de chaleur est elle aussi concernée, l'État développe les réseaux et encourage l'utilisation de la géothermie (la chaleur du sous-sol), des ordures ménagères et du charbon (qui sera subventionné jusque dans les années quatre-vingt !).

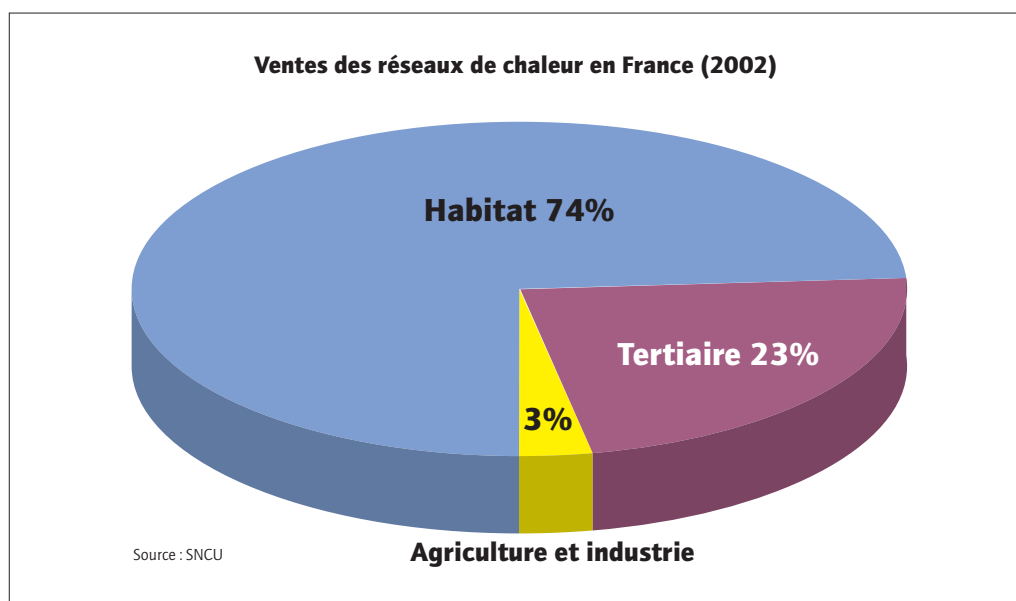
1 – Il s'agit ici des résidus de la combustion du charbon

QU'EST-CE QU'UN RÉSEAU DE CHALEUR ?

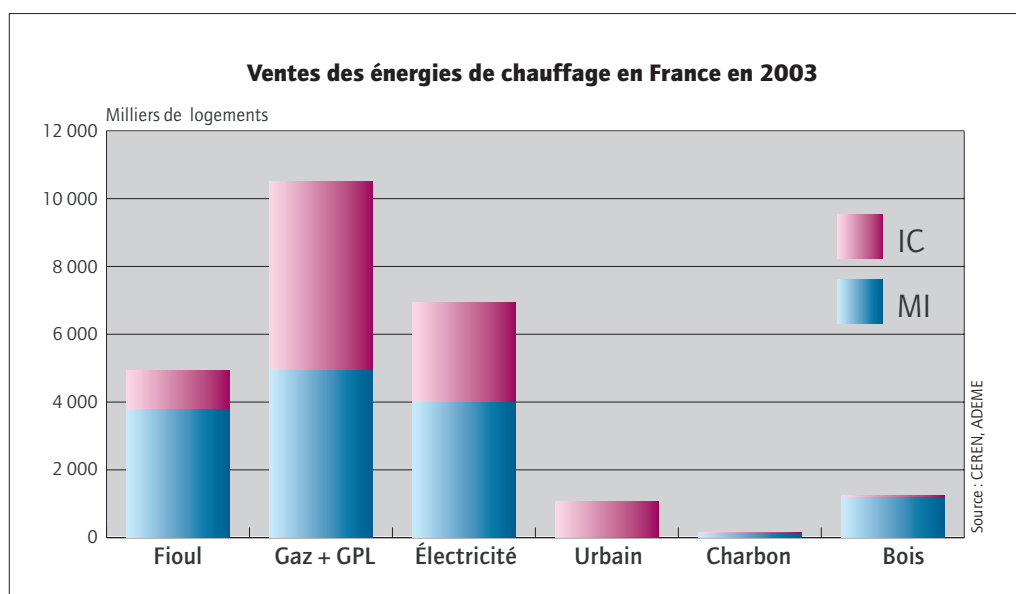
La définition que donne la DGEMP des réseaux de chaleur est la suivante :

« Un réseau de chaleur encore appelé réseau de chauffage urbain est un ensemble de canalisations qui empruntent, en général, le sous-sol des voies publiques pour distribuer de la chaleur en milieu urbain. La chaleur est transportée, soit sous forme d'eau chaude, soit sous forme de vapeur d'eau. Les utilisateurs se raccordent au réseau pour prélever, grâce à un échangeur, une partie de cette chaleur, puis ils la distribuent dans leurs locaux. La production de chaleur pour le réseau se fait dans des centrales importantes qui utilisent de multiples énergies telles que le fioul lourd, le charbon, le gaz, la géothermie ou la chaleur provenant de l'incinération des ordures ménagères. Il existe également des réseaux de froid qui distribuent de l'eau glacée destinée à la climatisation de locaux. »

Les réseaux de chaleur permettent de répondre à la fois aux besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Les deux grands clients du chauffage urbain sont le résidentiel et le tertiaire.



Dans le résidentiel, les réseaux desservent exclusivement des immeubles collectifs, et pèsent 5 % de la part de marché du chauffage en France.



ZONE D'ÉTUDE

L'Ile-de-France est la région de France qui possède le plus de réseaux de chaleur, 1 20 réseaux pour un total national de 394 [2]. Ce qui correspond à environ la moitié de la chaleur vendue dans le pays.

Nous avons restreint notre champ d'investigation aux quatre départements centraux de l'Ile-de-France pour plusieurs raisons.

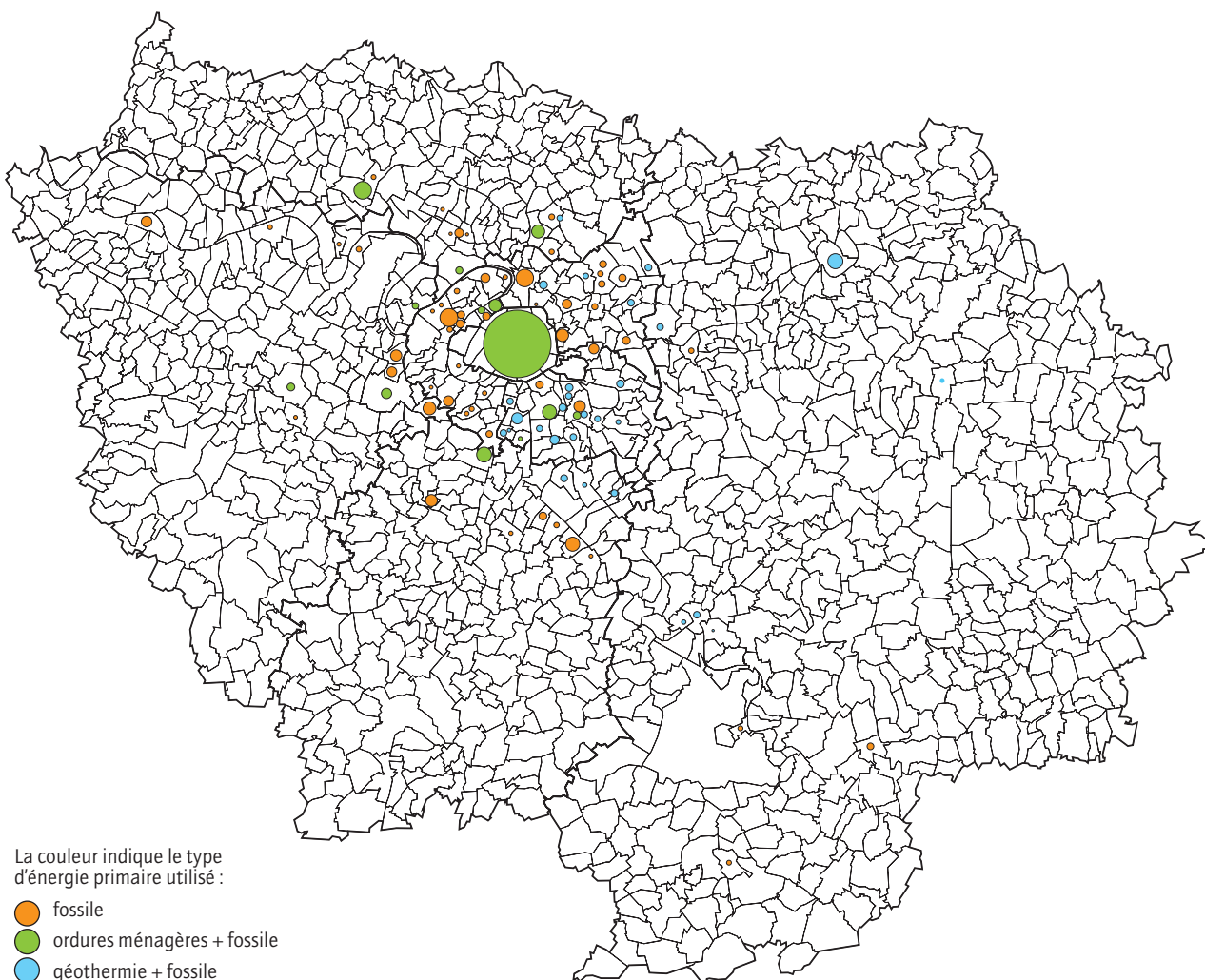
Tout d'abord l'essentiel de la chaleur vendue en Ile-de-France se fait dans la zone centrale (cf. carte), même si, on le voit bien, un périmètre « cœur d'agglomération » aurait été plus pertinent, nous ne l'avons pas retenu faute de données fines sur les densités, les îlots et les équipements qui nous servirons par la suite.

Ensuite, il nous a semblé opportun de poser la question du facteur 4 à une échelle locale. Les réflexions « facteur 4 » sont trop souvent des « cas d'école » à l'échelle nationale qui ignorent certaines contraintes locales fortes : les densités humaines, la valeur patrimoniale du bâti, la répartition des équipements, etc. Ces paramètres, nous le verrons par la suite, sont cruciaux dans le cas des réseaux de chaleur.

Chaleur vendue par les réseaux en Ile-de-France – 2000-2001

La taille des disques est proportionnelle aux nombres de MWh vendus :

○ pour 100 000 MWh



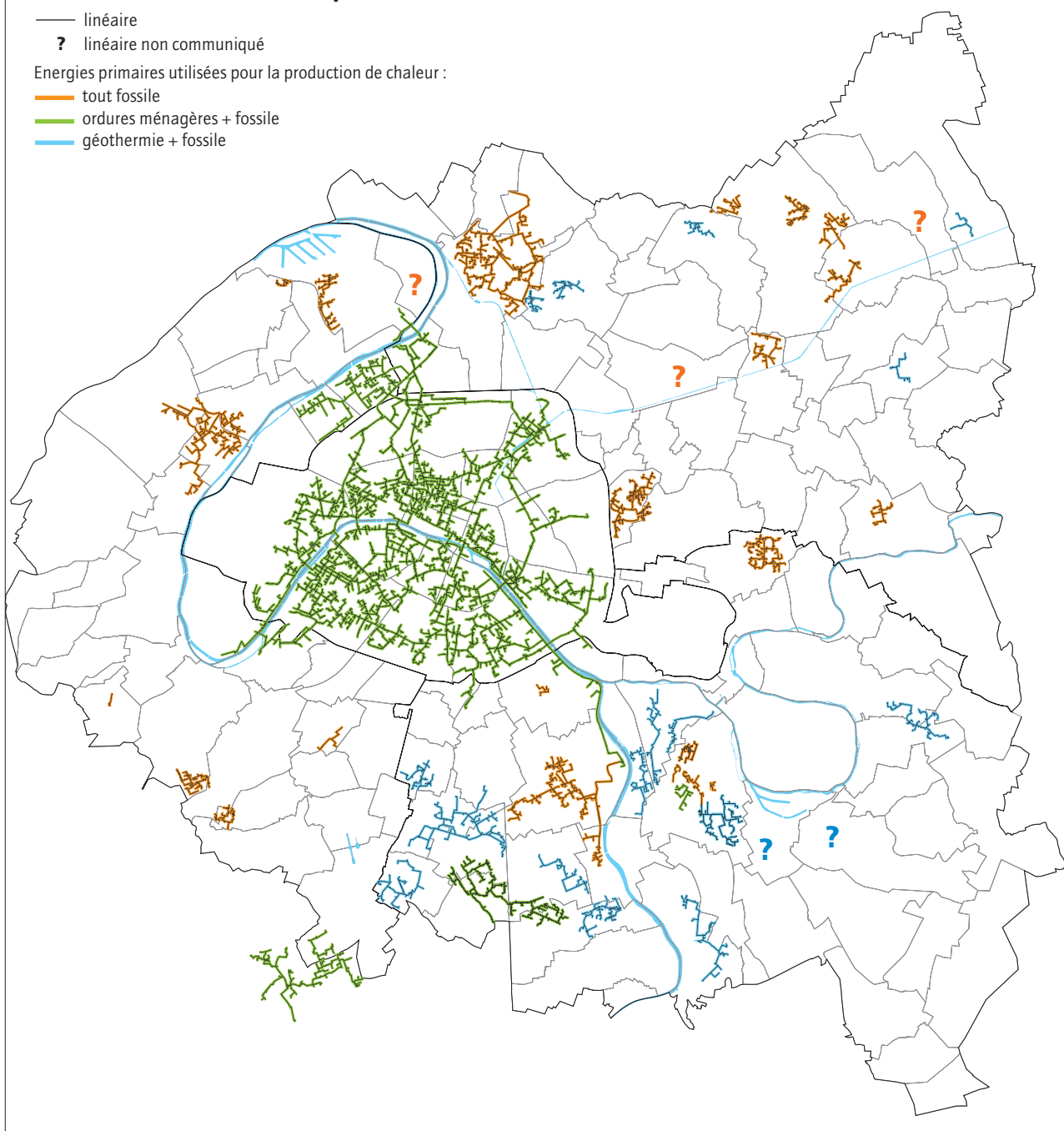
source : Viaseva

Réseaux de chaleur à Paris et en petite couronne

- linéaire
- ? linéaire non communiqué

Energies primaires utilisées pour la production de chaleur :

- tout fossile
- ordures ménagères + fossile
- géothermie + fossile



QUI EXPLOITE LES RÉSEAUX ?

L'exploitation des réseaux de chaleur n'est quasiment plus réalisée par les communes elles-mêmes (ce qu'on appelle la gestion en « régie »). Ce sont essentiellement des opérateurs privés qui exploitent les réseaux.

En France, l'exploitation des réseaux de chaleur est marquée par un « quasi » duopôle privé d'Elyo (groupe Suez) et de Dalkia (groupe Vivendi). Paris et la petite couronne reflètent bien la situation observée à l'échelle nationale, sur les 55 réseaux que nous avons recensés :

- un tiers est exploité par Elyo,
- un tiers par Dalkia,
- le dernier tiers est composé de trois opérateurs moyens (Socram, Cofathec (filiale de Gaz de France), Idex) et de quelques réseaux indépendants.

Mesurer la part exacte de chacun dans le total est en pratique impossible, les grands opérateurs comme Elyo ou Dalkia sont aussi à l'occasion des sous-traitants des réseaux dits « indépendants » (par exemple pour la maintenance des chaufferies), on les retrouve parfois même dans leur actionnariat. Leur part est donc vraisemblablement sous évaluée dans le total. On retiendra simplement que c'est un secteur marqué par un faible nombre d'acteur.

OÙ SONT LES RÉSEAUX DE CHALEUR ?

Répondre à cette question s'est avéré très difficile car l'information n'existait pas auparavant. Localiser les communes des 4 départements centraux qui accueillent des réseaux de chaleur est déjà difficile, en établir une cartographie précise et exhaustive a demandé un temps considérable (collecte d'information, numérisation de données, etc.). Pour se faire, avec l'appui du conseil régional Ile-de-France, nous avons contacté par courrier la totalité des exploitants pour leur demander les plans des réseaux qu'ils exploitent, afin de réaliser la carte de la totalité du linéaire de distribution de chaleur de Paris et sa petite couronne. Nous avons d'ailleurs constaté lors de nos entretiens téléphoniques que les exploitants ont souvent une connaissance très fragmentaire des réseaux adjacents aux leurs. Cet outil cartographique permet de restituer une vision globale de la géographie des réseaux et d'apprécier la part du territoire couverte par les réseaux de chaleur.

NB: les plans de réseaux n'existant que sur papier (à quelques exceptions près), il aura fallu redessiner en informatique tous les plans et vérifier la justesse de l'information (certains exploitants utilisent des fonds de plans complètement faux !). La carte proposée est quasiment complète, seuls cinq petits linéaires nous ont échappé (signalés par des points d'interrogation sur la carte).

LES ÉNERGIES UTILISÉES

Pour produire de la chaleur, les exploitants ont à leur disposition plusieurs solutions :

- brûler des combustibles fossiles (charbon, fioul ou gaz)
- s'ils ne sont pas trop loin d'une usine d'incinération, utiliser la chaleur dégagée par la combustion des ordures ménagères
- si le sous-sol s'y prête, utiliser les nappes d'eau chaude présente en sous-sol (la géothermie)

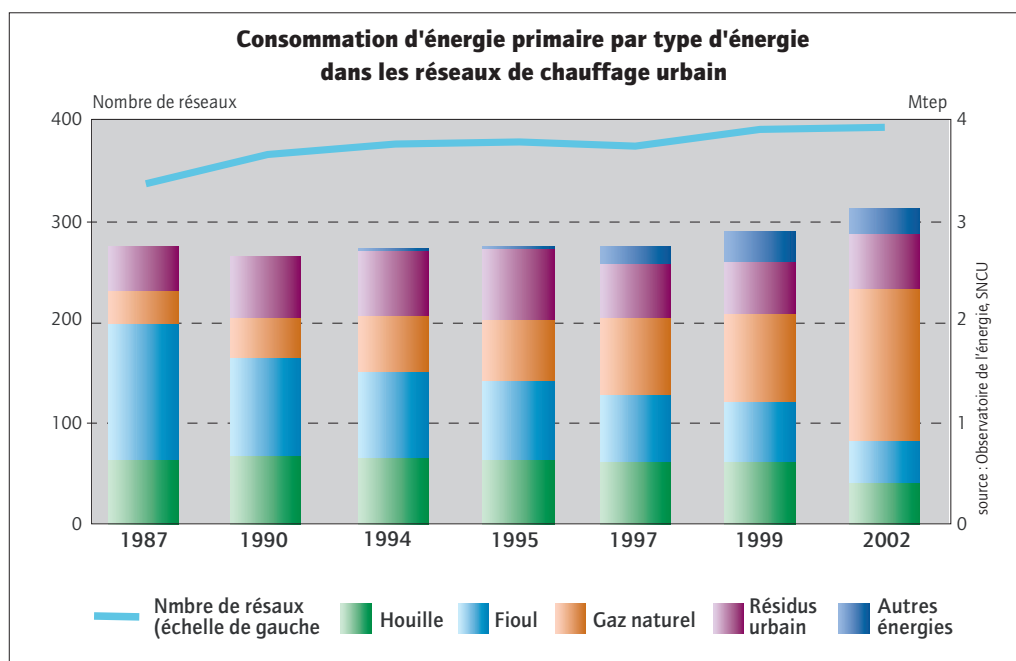
Néanmoins toutes ces solutions ne permettent pas répondre de la même manière à la demande de chaleur. L'utilisation des ordures ménagères et de la géothermie est très intéressante du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, mais ne permet pas de répondre au mieux aux périodes de pointe que l'on peut rencontrer en hiver (lorsqu'il fait très froid) ou lorsqu'un moyen de production est défaillant ; on utilise pour cela des combustibles fossiles qui servent d'appoint (fioul ou gaz). Un réseau qui serait uniquement basé sur les énergies renouvelables est impossible, il reste une part incompressible de l'approvisionnement qui doit être assurée par le fossile (~15 %). Les réseaux cartographiés sont regroupés en trois grandes familles : les réseaux entièrement basés sur le fossile, les réseaux qui utilisent les ordures ménagères et ceux qui utilisent la géothermie.

Passons rapidement en revue les énergies utilisées en cœur d'agglomération :

- Le charbon a aujourd'hui quasiment disparu du paysage énergétique, seul deux réseaux l'exploitent encore : le réseau de Bagnolet (comme énergie principale) et la CPCU dans une moindre

mesure (en tant qu'énergie de « semi-base »).

- Le fioul est très utilisé. C'est une énergie que les exploitants peuvent rapidement mobiliser afin d'ajuster au mieux la production à la consommation (pour les « pointes » ou le « secours »), il est plus rarement employé comme énergie principale (c'est le cas à La Défense et à Puteaux). C'est une énergie commode à utiliser en milieu urbain ; moins explosive que le gaz, les règles de sécurité liées à son exploitation sont peu contraignantes et permettent de réaliser des chaufferies parfaitement intégrées aux zones denses.
- Le gaz est l'énergie fossile la plus utilisée. Elle possède la même souplesse que le fioul (pour l'ajustement de la production), ce qui rend possible des réseaux 100 % gaz. Le gaz s'est aussi extrêmement répandu en cogénération, et ce, grâce aux conditions de rachat de l'électricité imposées à EDF. Beaucoup d'exploitants ont ainsi ajouté à leur activité celle de la production d'électricité décentralisée. L'explosion de la cogénération et le remplacement du fioul par le gaz se constatent aussi à l'échelle nationale :



- La chaleur issue de l'incinération des ordures ménagères est valorisée au mieux dans les 4 départements centraux, car toutes les unités d'incinérations valorisent leur énergie via un réseau de chaleur. Ce point est important car il n'est pas le reflet de la situation nationale. Les conditions de rachat de l'électricité très attractives imposées à EDF font que le débouché « chaleur urbaine » n'est pas systématiquement retenu ; et pour ne rien arranger, la connotation négative de l'incinération rend de plus en plus difficile le maintien des installations en zones urbaines denses et donc la possibilité d'une valorisation par le chauffage urbain. En petite couronne la localisation des incinérateurs permet cette valorisation, la densité de l'habitat aux alentours est toujours suffisante pour qu'un réseau y soit rentable.
- La géothermie est exploitée essentiellement dans le Val-de-Marne (elle l'est théoriquement partout !).
- La biomasse n'est pas exploitée !

ÉMISSION DE CO₂

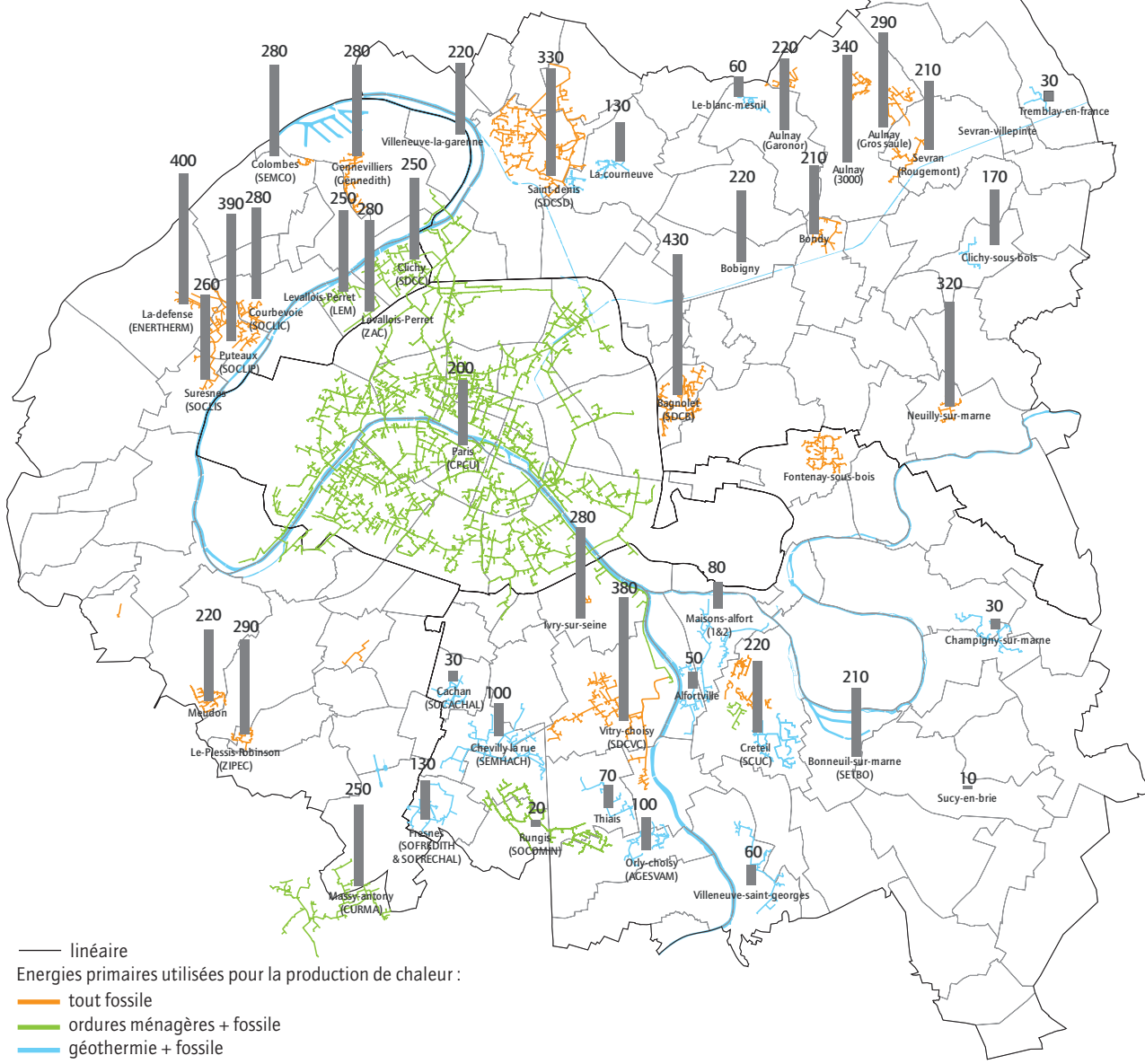
Les énergies qui servent à l'alimentation des réseaux ne sont pas toutes équivalentes en matière d'émissions de gaz à effet de serre : le charbon en émet plus que le gaz naturel qui est lui-même plus émetteur que la géothermie ; pour compliquer la chose, les réseaux sont rarement mono énergétiques. Se faire un avis sur les émissions de gaz à effet de serre des réseaux suppose de comparer les combinaisons énergétiques retenues par les exploitants.

Vaut-il mieux alimenter un réseau avec « 50 % de géothermie et 50 % de gaz » ou bien « 80 %

Émissions de CO₂ des réseaux de chaleur

(PNAQ et géothermies) en 2000/2001

70
grammes de CO₂ émis par kWh livré en sous-station



de gaz en cogénération et 20 % de fioul lourd » ?

Pour trancher il faut comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre induites par l'utilisation de telle ou telle forme d'énergie.

- Dans le cas des énergies fossiles, on prendra en compte les émissions liées à la combustion mais aussi les émissions en amont. En effet, avant même la combustion, des gaz à effet de serre ont déjà été émis : gasoil pour faire marcher le bateau qui importe le charbon d'Afrique du Sud, électricité pour raffiner le pétrole, fuites de gaz naturel (qui est lui-même un puissant gaz à effet de serre), etc.
- La valorisation des ordures ménagères n'engendre pas d'émissions
- La géothermie engendre des émissions très marginales liées aux pompes.
- La cogénération est sûrement le cas le plus complexe à traiter, car la production d'électricité doit être prise en compte. On a fait l'hypothèse que l'électricité produite aurait dû être produite dans tous les cas, et que donc, si elle n'avait pas été cogénérée, il aurait fallu la produire selon un moyen traditionnel de production électrique (cycle combiné gaz). Cette hypothèse simplificatrice que nous avons retenue pour nos calculs est très favorable à la cogénération et reste discutable.
- Enfin il faut prendre en compte les pertes liées à l'outil de production (chaufferie) et à l'achemi-

nement de la chaleur au pied des immeubles (« pertes de distribution ») ; ici on se borne à appliquer des valeurs forfaitaires que l'on applique à tous les réseaux (on distingue tout de même la vapeur de l'eau liquide pour la distribution).

NB : on renverra le lecteur aux annexes pour les hypothèses de calcul et les valeurs retenues pour établir la carte page précédente.

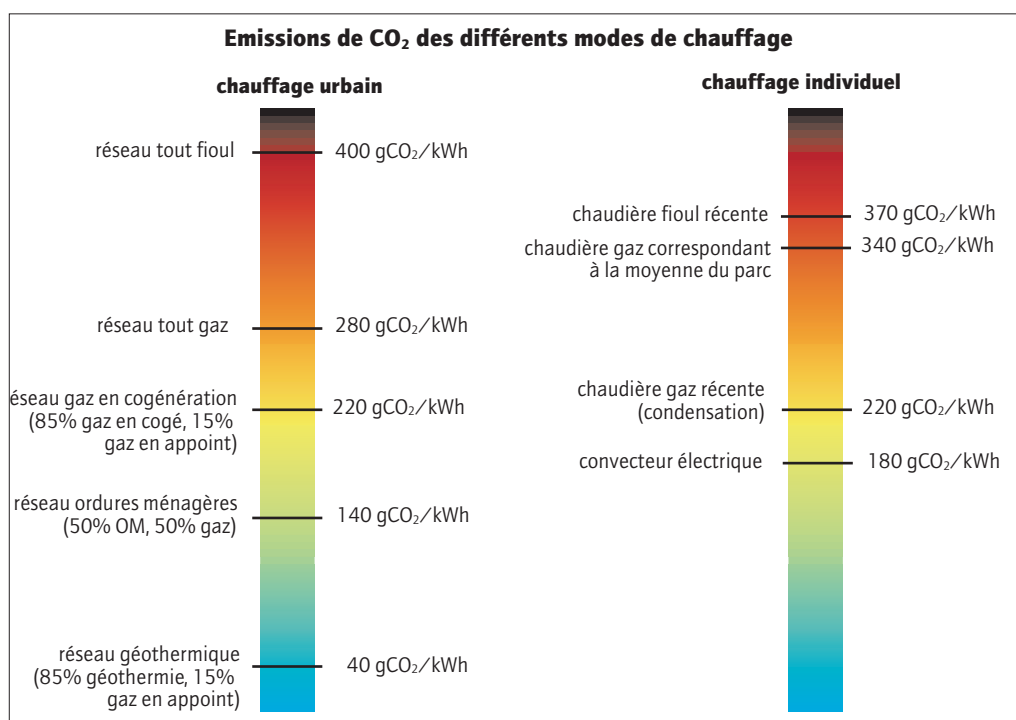
La prise en compte de toutes ces émissions permet de réaliser une carte illustrant l'impact en matière d'effet de serre des réseaux sur le secteur étudié. Notons que l'approche se limite à comptabiliser les émissions liées à l'utilisation des combustibles et les pertes occasionnées avant que la chaleur n'arrive en pieds d'immeuble ².

Que dire des émissions de CO₂ induites par l'activité de ces réseaux ?

Les écarts considérables qui existent entre les réseaux montrent bien que la question des réseaux est une question multiple. Il n'y a pas deux réseaux qui ont le même approvisionnement énergétique ce qui se traduit par une grande dispersion des résultats, il existe un facteur 10 entre les réseaux intensifs en effet de serre (fioul et/ou charbon) et les géothermies (en moyenne autour de 40gCO₂/kWh).

Comparons quelques réseaux « types » et avec les modes de chauffage individuels.

En individuel, les émissions sont moins dispersées, les énergies très intensives en CO₂, comme le



charbon ou le fioul, ont quasiment disparu (les dernières chaudières fioul subsistent surtout dans les équipements publics), a contrario les énergies les moins intensives en CO₂ ne sont pas possibles. C'est l'un des avantages du chauffage urbain. Il s'agit de la seule façon de valoriser la géothermie ou la combustion des ordures ménagères, qui sont des solutions très intéressantes du point de vue des émissions de gaz à effet de serre. À l'inverse, dès qu'on compare les réseaux « fossiles » aux modes individuels, l'avantage tourne au chauffage individuel car les chaudières disponibles sur le marché sont aujourd'hui très performantes (autant, voire plus que les chaufferies industrielles).

On constate rapidement que c'est la part d'énergie renouvelable ou « fatale » d'un réseau qui détermine son intérêt vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre.

Depuis 2006, la législation encourage les réseaux à atteindre l'objectif de 60 % d'énergie renouvelable grâce à une baisse de la TVA de 19,6 % à 5,5 % (sur la fourniture) ; ce qui correspond à des émissions de 120 à 160gCO₂/kWh.

Aujourd'hui seuls les réseaux géothermiques et un réseau d'ordures ménagères (Rungis) remplissent cet impératif.

² – En toute rigueur il aurait fallu prendre en compte toutes les autres consommations : électricité pour faire fonctionner le site, les pompes, l'eau, le traitement de cette eau (dans le cas de la vapeur), etc. Ce qui est impossible dans une approche globale, c'est un travail à effectuer site par site

L'EFFET « FACTURATION »

On a comparé précédemment les modes de production de chaleur et montré en quoi certaines solutions basées sur les renouvelables exploitées par les réseaux de chaleur sont particulièrement intéressantes. On s'est en quelque sorte posé la question de ce qui intervient en amont de la « consommation ». Mais qu'en est-il de la consommation elle-même ? Les différentes solutions de chauffage incitent-elles toutes à consommer l'énergie de chauffage de la même manière ?

En matière d'émissions l'enjeu n'est pas anecdotique, si des efforts sont réalisés pour produire une énergie de chauffage peu émettrice en gaz à effet de serre, il faut aussi s'assurer que son usage se fait dans bonnes conditions, que l'utilisateur ne la gaspille pas. Sinon ce qui est gagné d'un côté est perdu de l'autre.

Dans le cas du chauffage individuel, chaque locataire paye sa consommation auprès des grands fournisseurs d'énergie, principalement EDF ou GDF. Dans le cas du chauffage collectif, que ce soit un chauffage collectif d'immeuble ou chauffage urbain, le locataire ne s'en acquitte pas directement auprès du fournisseur d'énergie, il paye dans ses charges une part du total de l'immeuble.

Ces deux modes de facturation ont des conséquences très visibles sur les consommations d'énergie des ménages ; la facturation individuelle incite aux économies d'énergie, car le fait de payer exactement ce qu'on doit, a un effet « responsabilisant », en particulier si l'énergie est chère.

Les économistes utilisent le terme d'« élasticité » pour caractériser la variation de la demande en fonction du prix. Dans le cas du chauffage individuel, l'élasticité est forte, l'augmentation du prix de l'énergie se traduit rapidement par une baisse de la consommation ³. Les modes collectifs diluent énormément la responsabilité des consommateurs, dans la mesure où chacun ne peut réellement mesurer sur sa facture l'effet d'éventuelles économies d'énergie.

Peut-on chiffrer cette différence ? Introduisons pour cela une grandeur qu'on appelle « la consommation théorique » des bâtiments. Cette consommation est la quantité d'énergie qu'il faut fournir au bâtiment pour le maintenir à 19 °C (cette grandeur dépend des matériaux de construction utilisés, du taux de vitrage, de l'orientation, etc.). Pour les raisons indiquées ci-dessus, le chauffage urbain se situe de 10 à 30 % au-dessus des consommations théoriques, le chauffage individuel est en dessous de ces consommations théoriques, jusqu'à 30 %.

Les données de l'« Observatoire de l'énergie » [3] déclarent qu'il existe un facteur 2 entre le chauffage collectif et l'individuel (c'est-à-dire le haut de la fourchette annoncée ci-dessus).

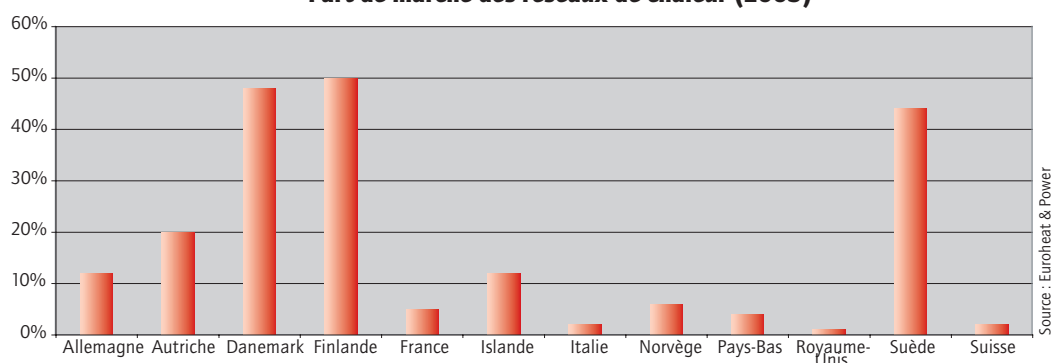
	Proportion de logement dans le parc en 2002	Part de la consommation de chauffage en 2002
Immeubles avec chauffage collectif	19,1 %	18,7 %
Immeubles sans chauffage collectif	24,3 %	11,5 %

(Là où le chauffage individuel consomme 1 kWh, le chauffage collectif en consomme

$$\frac{(18,7 / 19,1)}{(11,5 / 24,3)} = 2,05 \text{ kWh}$$

L'individualisation des charges est sûrement l'un des grands enjeux du développement des réseaux de chaleur. Les pays d'Europe du nord sont souvent cités en exemple dès qu'on parle d'environnement. Les réseaux y sont plus présents que dans notre pays.

Part de marché des réseaux de chaleur (2003)



3 – A l'inverse du secteur des transports, où une très forte augmentation du prix du carburant est nécessaire pour voir baisser le kilométrage des ménages

L'individualisation des charges se met en place dans ces pays depuis 25 ans, et à chaque fois il y a à la clé une réduction des consommations de 15 à 20 % ! L'enjeu est donc colossal. La force de ces pays est d'avoir su imposer un cadre réglementaire très coercitif : les permis de construire ne sont pas délivrés si les consommations de chauffage ne sont pas individualisées.

Aujourd'hui l'individualisation est techniquement possible, et économiquement faisable (un compteur vaut de 100 à 200 euros). Avec les systèmes actuels, il n'y a même plus besoin de faire de la relève de compteur, les données des consommations sont transmises en temps réel à un « central » qui gère la facturation des usagers du réseau.

L'individualisation n'est pour l'instant pas envisagée dans notre pays, c'est un sujet que les exploitants n'abordent pas trop. Elle est très certainement économiquement difficile à négocier. Les communes qui possèdent des réseaux de chaleur se sont progressivement déchargées de l'exploitation qui est un métier très spécifique et complexe. L'administration des réseaux est aujourd'hui majoritairement le fait de la sphère privée. On comprend bien que les exploitants puissent difficilement engager d'eux-mêmes ce chantier. La puissance publique doit donc instaurer un cadre législatif contraignant comme cela s'est fait ailleurs en Europe ; il est mathématiquement possible de chauffer des bassins de population plus importants sans augmenter les capacités de chauffage actuelles, mais les investissements sont importants et méritent une analyse au cas par cas. Notons que l'enjeu n'est pas le même pour tous les réseaux, il dépend de la fourniture énergétique. Pour les réseaux entièrement géothermiques il s'agit peut-être d'un enjeu minime ⁴, mais il est considérable pour les réseaux qui assurent une grande part de leur approvisionnement par le fossile.

Notons que la question de l'individualisation, si elle n'est pas traitée, pourrait être après 2012 fatale à beaucoup de réseaux. La facturation collective n'est acceptée par les populations que si l'énergie de chauffage est vendue à bas prix. Dans un futur proche, si la cogénération n'est plus subventionnée aux taux actuels (c'est le cas après 2012) et que les prix des matières premières énergétiques décollent, la chaleur vendue ne pourra se maintenir aux niveaux actuels. Dans ce scénario, l'individualisation est nécessaire pour éviter les débranchements.

LES MÉCANISMES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂

Si l'objectif du « facteur 4 » est l'effort à consentir pour enrayer la dérive climatique, il n'en reste pas moins ambitieux. Et ne fait pas encore l'objet de politiques de long terme dans notre pays. Seul le protocole de Kyoto se traduit en dispositions concrètes visant à ramener les émissions de l'Europe, 8 % en deçà de leurs valeurs de 1990 d'ici 2008-2012. Une de ces dispositions est la création d'un marché international de quotas d'émissions qui verra le jour sur la période 2008-2012. L'Europe a décidé, dès 2005, d'anticiper la mise en place de ce marché afin de « rôder » les acteurs communautaires ; on a ainsi décidé de créer un marché européen d'échange d'émissions de CO₂ sur la période 2005-2007, basé sur l'affectation de quotas (le « PNAQ » : Plan National d'Affectation de Quotas) aux secteurs de l'industrie et de l'énergie (dont le chauffage urbain fait partie).





Avant de discuter du mécanisme, rappelons quelques chiffres. Les émissions ont été stables en France entre 1990 et 2004, néanmoins ce constat cache des tendances très contradictoires : les secteurs des transports et du résidentiel/tertiaire se sont envolés ⁵ alors que dans le même temps l'industrie, la production d'énergie et l'agriculture ont reculé ⁶.

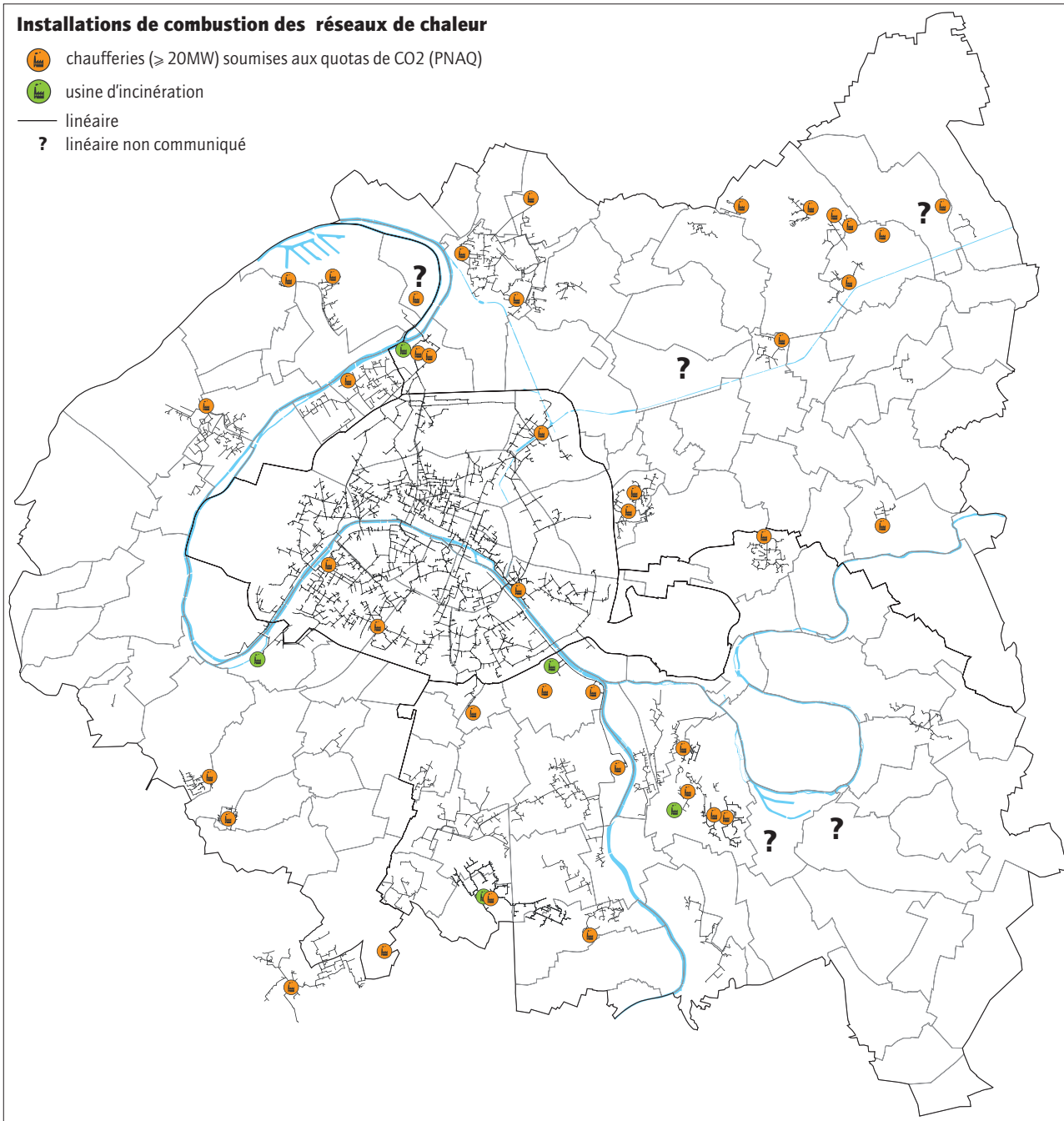
Au cours de cet exercice, l'industrie « au sens large » a été soumise à la mise en place d'une réglementation européenne de plus en plus contraignante vis-à-vis des émissions de polluants locaux, nécessitant la mise en place de toute une logistique pour le traitement des fumées, des eaux usées, etc. Les investissements consentis se sont traduits, entre autres, par des gains d'efficacité énergétique et donc des émissions en moins. En d'autres termes, les gains sur les émissions les moins coûteux ont été effectués durant cette période.

Les tendances actuelles des émissions laissent penser que l'objectif de Kyoto pour la France ne sera pas atteignable sans efforts. On assiste aujourd'hui à une reprise de l'industrie et de l'énergie, et à une littérale explosion des secteurs transport et résidentiel/tertiaire. Ainsi un scénario de type « laisser faire » conduirait le pays à augmenter ses émissions de 9 % et donc à ne pas res-

4 – Dans ce cas, les gains d'économie d'énergies peuvent ne pas trouver de débouché dans la mesure où les clients s'organisent en cascade : du plus consommateur au moins consommateur
5 – transports +22,7 % et résidentiel/tertiaire +22,3 % (entre 1990 et 2004)
6 – agriculture -10,5 %, -9,1 % énergie, -21,6 % industrie (entre 1990 et 2004)

Installations de combustion des réseaux de chaleur

-  chaufferies ($\geq 20\text{MW}$) soumises aux quotas de CO₂ (PNAQ)
-  usine d'incinération
-  linéaire
-  linéaire non communiqué



pecter l'objectif de Kyoto (qui est de 0 % pour la France).

Le PNAQ est l'un des dispositifs censé permettre à notre pays de respecter cet engagement. Le principe du PNAQ est assez simple, chaque acteur reçoit un « droit » à émettre qu'il doit satisfaire sur une période, si l'acteur émet plus que l'enveloppe allouée il peut acheter sur un marché européen des droits à émettre que d'autres n'auront pas utilisés. L'intérêt du procédé est de réaliser à moindre coût à l'échelle européenne les investissements permettant d'atteindre l'objectif global.

Si on se penche sur les chiffres, les installations concernées par le PNAQ émettaient en 2002, 135 MtCO₂⁷, la France a décidé de leur allouer sur la période 2005-2007 un droit à émettre de 156 MtCO₂. Si le PNAQ est censé ramener la France dans le sillage de Kyoto, il peut paraître paradoxal que la principale initiative européenne prévoit une augmentation de nos émissions !

Pour comprendre, il faut revenir à l'origine de l'application de ce mécanisme. Dans sa mise en place, l'Europe a appliqué le principe de subsidiarité, c'est-à-dire qu'elle a confié le soin à chaque État de définir lui-même ses enveloppes. Ainsi, en pratique, chaque pays a été amené à discuter

7 – MtCO₂ : millions de tonnes de CO₂

directement avec les fédérations professionnelles qui ont avancé « en coulisse » les arguments suivants :

- l'industrie est un secteur qui a su réduire de beaucoup ses émissions depuis les années quatre-vingt-dix, c'est désormais aux autres secteurs de s'engager dans cette voie
- l'exercice 2005-2007 est conçu pour tester l'économie à la contrainte carbone non pour la sanctionner
- tous les états auront tendances à être laxistes dans l'affectation, donc il ne faut pas pénaliser l'industrie nationale par rapport aux concurrents européens

En définitive ce qui n'a pas marché, et ce qui rend le plan inutile, c'est la trop grande proximité entre « rationneur » et « rationné ». L'État s'est retrouvé « captif » de son économie.

On a sûrement raté ici une bonne occasion de tester l'économie à la contrainte carbone. Si après 2012, l'État est contraint de devenir interventionniste en donnant une valeur marchande au CO₂, les acteurs économiques n'auront pas été préparés et devront faire preuve de beaucoup de souplesse. L'effet pervers du PNAQ aura été d'avoir mis l'industrie à l'abri de la contrainte carbone ce qui peut être un très mauvais calcul économique à moyen terme.

Le Plan Climat prévoyait qu'il fallait économiser 54 MteCO₂⁸ pour satisfaire l'objectif de Kyoto ; avec le PNAQ, c'est désormais 75 MteCO₂ qu'il faut trouver en dehors des secteurs de l'énergie et de l'industrie ! L'objet de Kyoto est rendu plus difficilement atteignable avec le PNAQ, c'est son principal effet pervers.

EXTENSIONS, DENSIFICATIONS... PEUT-ON FAIRE PLUS DE RÉSEAUX DE CHALEUR ?

La carte ci-contre fait correspondre les linéaires des réseaux avec la densité humaine (la somme des densités résidentielle et tertiaire). Tous les réseaux se sont développés sur des territoires suffisamment denses pour que la vente de chaleur soit rentable. Il est en pratique difficile de quantifier la densité minimale de rentabilité d'un réseau, en revanche une simple lecture « qualitative » de la carte montre que des bassins importants de population restent à exploiter par les réseaux (dépasser 50 habitants/emplois à l'hectare semble suffisant). Le travail d'informatisation des plans des exploitants a montré que les réseaux se satisfont d'un habitat collectif pas trop dilué, en revanche, systématiquement, les zones pavillonnaires ne sont pas raccordées même quand les réseaux transitent par ces zones.

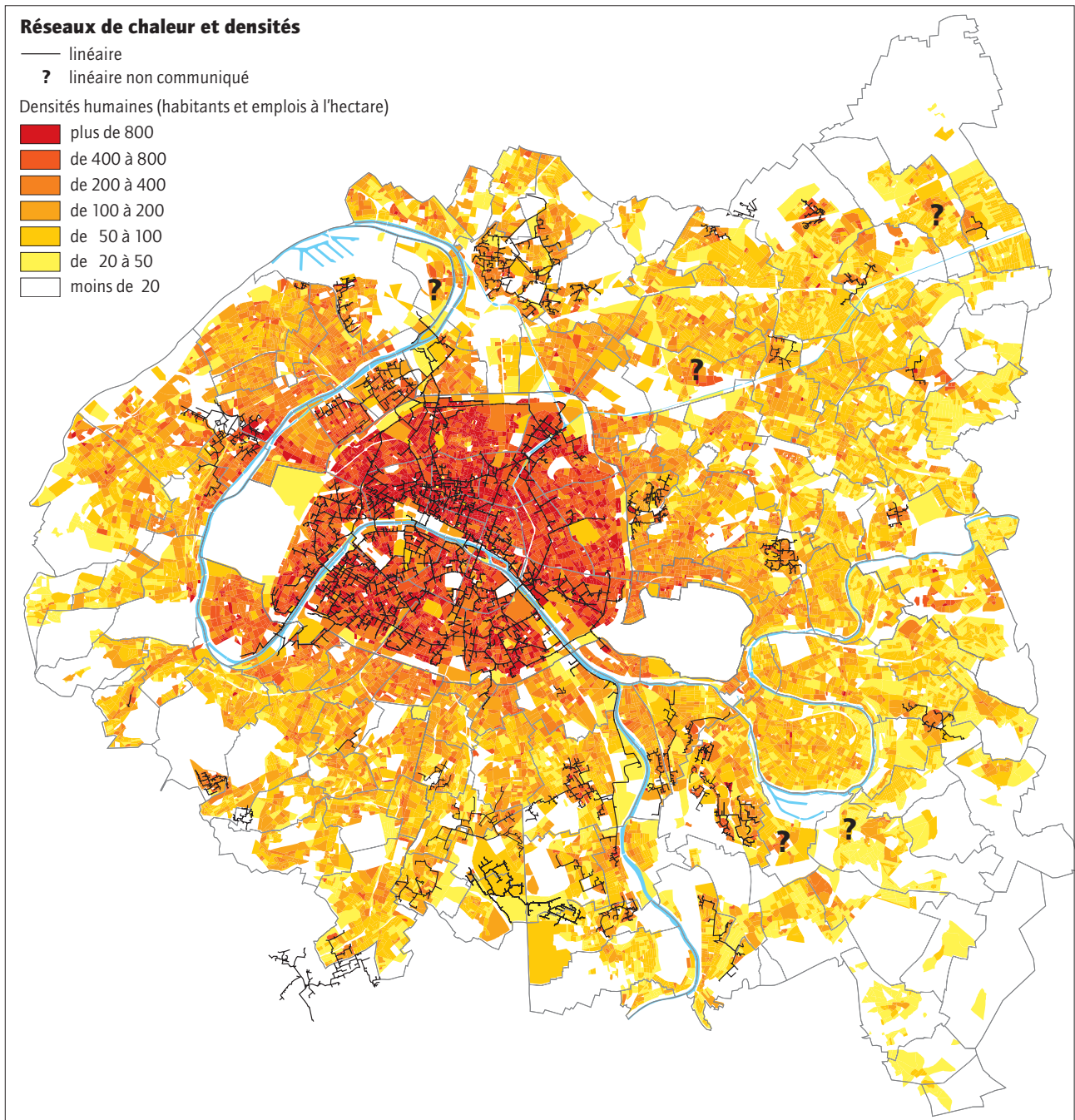
Le développement des réseaux passe par des extensions, des densifications et des raccordements entre réseaux. À ce titre le réseau parisien est un bon exemple de regroupement, puisqu'il connecte au nord Clichy et Levallois et au sud Vitry/Choisy.

LES ÉNERGIES DE DEMAIN

Les combustibles fossiles sont à l'avenir amenés à poser plusieurs types de problèmes. Nous avons déjà abordé la question des émissions, la question de la dépendance énergétique se pose aussi car nous importons la totalité de nos besoins.

- Le fioul lourd, qui est très utilisé par les réseaux, est considéré par les raffineries comme un produit « fatal », un produit que l'on obtient quoiqu'il arrive lorsqu'on fait du carburant avec du pétrole. Seulement, aujourd'hui, la demande de transport explose littéralement, il est très probable que le fioul lourd soit de plus en plus consacré à la satisfaction de la demande de diesel, ce qui en augmentera le prix (pour une simple question d'offre et de demande). Autrement dit le fioul pourra devenir un produit onéreux même en l'absence d'une quelconque envolée des prix du brut.
- Le gaz restera vraisemblablement très prisé par les exploitants. Ce qui va changer c'est la place de la cogénération. Aujourd'hui la production conjointe d'électricité et de chaleur est rémunérée par l'obligation de rachat imposée à EDF. Les conditions de rachats sont très intéressantes, ce qui a permis le démarrage rapide de la cogénération depuis 1997. Sur le papier, la technique semble très intéressante puisqu'elle permet une meilleure efficacité énergétique que la production disjointe d'électricité et de chaleur. Seulement, en matière d'effet de serre, un des critères décisifs est le coût d'une mesure. Comme les caisses de l'État ne sont pas illimitées, si solution coûte 1 et qu'une autre coûte 3, à résultat identique on choisira la solution qui coûte 1. Aujourd'hui la sub-

⁸ – MteCO₂ : millions de tonnes équivalent CO₂ (les autres gaz à effet de serre sont pris en compte et rapportés à l'effet de serre qu'induirait leur équivalent en CO₂)



vention accordée à la cogénération se chiffre de 1000 à 2000 euros la tonne de CO₂ évitée [5], ce qui est beaucoup. Le recours à la biomasse par les réseaux de chaleur coûte de 300 à 700 euros et la géothermie moins de 300 euros [6]. Les contrats de cogénération courent jusqu'en 2012, au-delà le marché régulera l'offre, et il est vraisemblable que les opérations les plus « opportunistes », celles créées pour profiter de l'obligation de rachat mais ne répondant pas à une vraie demande de chaleur (« moteurs à gaz »), ne puissent subsister. Inversement, les grosses installations, plutôt tournées vers la demande de chaleur (« turbine à gaz ») semblent plus viables sur le futur marché.

- Le charbon est une énergie très plébiscitée aujourd'hui. Nous avons souvent en tête qu'il s'agit une énergie désuète, à tort. L'essentiel de la production d'électricité dans le monde est assuré par le charbon. C'est l'énergie la plus intensive en CO₂, mais c'est aussi la plus abondante sur la planète ⁹. Si la contrainte carbone ne fait pas son incursion dans l'économie mondiale, c'est l'énergie sur laquelle se reporteront naturellement les usages assurés aujourd'hui par le pétrole. L'enjeu qui pèse sur le charbon est donc colossal. La France en tant qu'ancien pays producteur de charbon a longtemps été favorable à son utilisation. Elle fut subventionnée jusque dans les années quatre-vingt et reste aujourd'hui l'une des énergies les moins taxées. Néanmoins son retour en force dans

9 – Même si aux rythmes actuels les ressources ne nous permettent pas d'assurer les besoins après la fin du XXI^e siècle.

l'approvisionnement des réseaux de chaleur semble difficile et nettement moins probable que dans la production d'électricité. Son exploitation en zone dense pose des problèmes de gestion des effluents complexes et gourmands en espace. Toute la logistique liée à l'approvisionnement demande elle aussi beaucoup de foncier.

- La biomasse, encore inexploitée par les réseaux, est l'énergie « phare » de la lutte contre l'effet de serre. C'est aussi une énergie qui suppose une bonne maîtrise des émissions intermédiaires (transports en particulier). Pour contenir ces émissions, il est préférable de mutualiser les acheminements et si possible par fleuve ou par fer, ce qui en pratique n'est réalisable que via les réseaux de chaleur. Outre la biomasse issue de la sylviculture, la biomasse des déchets industriels pourrait aussi être valorisée thermiquement (elle est fréquemment brûlée directement sur les chantiers).
- Sur le périmètre étudié toutes les unités d'incinération valorisent thermiquement les ordures ménagères. On peut considérer la ressource comme totalement exploitée. Néanmoins, dans la phase de tri des ordures avant incinération, on se dirige de plus en plus vers une séparation de la biomasse sèche et de la biomasse humide. Cette dernière (les « fermentescibles ») peut produire du méthane valorisable par les réseaux de chaleur (le débouché thermique étant plus intéressant que la valorisation électrique en matière de gaz à effet de serre).
- Terminons par la géothermie. Le sous-sol de l'Ile-de-France se prête particulièrement à l'exploitation de cette forme d'énergie, même si le gisement global extractible du sous-sol n'a pas été réellement chiffré. Il s'agit d'un moyen peu coûteux de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre qui devrait faire, tout comme la biomasse, la priorité de toute politique publique de développement des réseaux.

Julien Bigorgne

Ingénieur environnement

Atelier Parisien d'Urbanisme

Novembre 2006

Annexe 1 : facteurs d'émission et rendements des installations

Les énergies fossiles :

Lorsque l'on brûle un combustible fossile, le carbone contenu dans le combustible est oxydé par l'oxygène de l'air, ce qui émet du CO₂ dans les proportions suivantes :

	Émissions de CO ₂ pour la combustion en gCO ₂ /kWh <small>Source : IPCC 2001</small>
Fioul lourd	279
Fioul domestique	267
Charbon	342
Gaz	203

Avant que les industriels ne les brûlent, ces énergies ont sollicité pour leur transport, leur extraction ou leur traitement d'autres émissions de gaz à effet de serre qui sont loin d'être négligeable, elles interviennent à hauteur de 10 % du total.

	Émissions de CO ₂ pour l'extraction, le transport et le traitement en gCO ₂ /kWh <small>(source : IFP [7])</small>	Émissions de CO ₂ pour la combustion en gCO ₂ /kWh <small>(source : IPCC 2001)</small>	Émissions de CO ₂ pour la combustion en gCO ₂ /kWh
Fioul lourd	39	279	318
Fioul domestique	29	267	296
Charbon	27	342	369
Gaz	21	203	224

On voit bien à quel point le choix de l'énergie fossile aura des répercussions sur les performances du réseau étant donné les écarts ; par exemple, le charbon est 40 % plus émetteur que le gaz.

La géothermie :

Plus on va puiser de l'eau profondément, plus cette eau est chaude et ceci à cause de la désintégration des éléments radioactifs naturellement contenus dans les roches de la croûte terrestre. Ce processus émet de la chaleur qui chauffe les roches et donc les nappes d'eau qui s'y trouvent. Lorsque l'on exploite l'eau chaude du sous-sol, on dispose d'une énergie « quasi » inépuisable, c'est pour cela qu'on la qualifie de « renouvelable ». Très souvent cette eau ne jaillit pas d'elle-même, il faut donc la pomper ce qui occasionne des consommations d'énergie électrique, en Ile-de-France pour 1 kWh électrique investi dans le pompage on récupère de 9 à 37 kWh d'énergie thermique distribuable par le réseau de chaleur. La largesse de la fourchette est due au fait que la nappe exploitée (le « Dogger ») n'est pas homogène en température et en pression, le lieu d'exploitation est donc un facteur clé de la réussite d'une opération de géothermie.

Rendement du gisement géothermique (COP)	Émissions de CO ₂ de l'électricité industrielle en gCO ₂ /kWh <small>(source : EDF [8])</small>	Émission de CO ₂ liée à l'utilisation de la ressource géothermale en Ile-de-France en gCO ₂ /kWh
De 9 à 37	55	< 10 gCO₂/kWh

L'impact en matière d'effet de serre de la géothermie est très faible, car les rendements sont très bons et que l'électricité utilisée pour le pompage est très peu « carbonée » (c'est le cas en France).

Les ordures ménagères :

La combustion des ordures ménagères dégage de l'énergie qu'il est possible de valoriser avec un réseau de chaleur.

L'incinération, comme toute combustion dans l'air, émet du CO₂, néanmoins ce CO₂ est compté comme nul quand la chaleur est utilisée par un réseau, ce qui peut paraître paradoxal. En fait, la responsabilité de l'émission de ce CO₂ est à attribuer aux personnes qui sont à l'origine des déchets : par exemple si quelqu'un consomme un pot de yaourt, il aura engendré l'émission des gaz à effet de serre nécessaires à la fabrication du lait (gasoil pour faire tourner le tracteur, gaz naturel pour la fabrication des engrais, etc.), aux procédés industriels de fermentation, à la fabrication du plastique (issu de la pétrochimie) pour faire l'emballage et enfin à l'élimination du pot via l'incinération. La chaleur qui est dégagée lors de l'incinération sera émise quoiqu'il arrive (on parle de chaleur « fatale »), si elle est récupérée pour alimenter un réseau de chauffage alors elle est valorisée et cette chaleur est considérée comme neutre en émissions de gaz à effet de serre cad qu'elle engendre 0 gCO₂/kWh.

La cogénération :

Il existe deux types de cogénération. Pour les faibles puissances, les exploitants utilisent plus la technique du « moteur à gaz », c'est-à-dire une sorte de gros groupe électrogène. Les rendements sont peu favorables à la production de chaleur (37,5 % de chaleur et 37,5 % d'électricité). Pour les grosses puissances, on cogénère avec des « turbines à gaz », qui est une technique issue de l'aviation. Les rendements sont très favorables à la production de chaleur (51 % chaleur, 31 % électricité).

Faute de données précises on a considéré qu'au-delà de 10 MW installés la cogénération se fait par turbine, et en deçà par moteur. En théorie on trouve des turbines qui descendent sur des puissances plus faibles, mais nos enquêtes de terrain nous ont montré que les exploitants se tournent plus vers les moteurs (quitte à en mettre plusieurs en série) sur les basses puissances. C'est dû à l'aspect très rémunérateur de l'électricité cogénérée dans les conditions de rachat actuelles imposées à EDF.

Dans les calculs, nous avons considéré que l'électricité produite se substitue à celle d'un cycle combiné gaz (400gCO₂/kWh) que l'on retire des émissions du réseau, ce qui est très discutable. La bonne façon de comptabiliser l'électricité produite est très compliquée, elle se situe entre l'hypothèse que nous avons retenue et une hypothèse plus « conservatrice » qui ne prend pas en compte l'électricité produite.

Les pertes liées à la production et à la distribution :

Abusivement lorsqu'on parle des réseaux de chaleur, on parle de « production d'énergie », en réalité il n'en est rien, l'activité des exploitants consiste à transformer (et non produire) l'énergie pour la rendre utilisable à des fins de chauffage. L'énergie nous est donnée une fois pour toutes, seules les transformations sont possibles. Et comme ces transformations ne sont pas parfaites, elles occasionnent des pertes, on parle de « dégradation de l'énergie ». Dans le cas des réseaux de chaleur les principales pertes ont lieu dans les chaufferies et dans les canalisations qui acheminent la chaleur.

Les réseaux utilisent de l'eau comme fluide pour transporter la chaleur des lieux de production aux lieux de distribution. L'eau est soit sous forme liquide (eau chaude ou surchauffée) soit sous forme vapeur. Mis à part la CPCU et le réseau de Clichy (SDCC), plus aucun réseau n'utilise la vapeur aujourd'hui. La raison est historique, c'est le premier fluide utilisé par les réseaux de chaleur qui ont été créés au début du siècle (Paris, New York...). Le choix du fluide est dimensionnant, c'est-à-dire qu'il est impossible de songer passer de l'un à l'autre. La vapeur est un fluide coûteux en entretien, techniquement complexe à maîtriser c'est pour cela qu'il n'est plus employé par les réseaux récents.

L'acheminement du fluide entre les chaufferies et les pieds d'immeubles occasionnent des pertes allant de 5 à 15 % si l'eau liquide est utilisée (on utilisera la valeur de 7 % pour les calculs) et de 20 % dans le cas de la vapeur (les pertes un peu plus élevées sont liées à la nature du fluide mais aussi à l'âge du réseau et à son très grand linéaire) [9].

Concernant les chaufferies, des chaudières récentes et bien exploitées ont des rendements qui dépassent les 90 %, ce rendement est le rendement théorique maximal qui n'est pas toujours atteint en pratique, faute d'informations précises sur les réseaux et l'âge des chaufferies, on retiendra la valeur de 86 % pour l'exploitation des chaudières industrielles sur l'année.

ANNEXE 2 : répartitions des énergies primaires

Tous les calculs d'émissions de CO₂ ont été réalisés sur la base de l'annuaire des réseaux de Viaseva (2000-2001). Nous n'avons pu nous procurer d'informations plus récentes auprès d'Amorce et SNCU, qui réalisent pourtant périodiquement des enquêtes auprès des exploitants. Les données utilisées pour faire les calculs sont regroupées dans le tableau suivant.

Réseau	Description du réseau													COP	gCO ₂ /kWh	Remarques			
	Données 2000/2001/2002											Présence de cogénération	Puissance électrique (MW)						
	Énergies utilisées (en %)																		
Longueur (km)	Chaleur vendue (MWh)	Fuel lourd	Fuel domestique	Charbon	Bois	Gaz naturel	Géothermie	UIOM	Autres		type	(%)							
Alfortville	8	60000		5		10	85												non
Aulnay-sous-bois (3000)	4,4	46500	50			50								non			340		
Aulnay-sous-bois (garonor)	5	33110		5		95								oui	2,9		220		
Aulnay-sous-bois (gros saule)	8	44000	27,65			39,29					récupération co-génération	33	oui	8			290		
Bagnolet	18	164000	11		83	1					électricité	5	non				430	électricité utilisée en été (55gCO ₂ /kWh)	
Bobigny	5,4	95000	4			96							oui	10,6			220		
Bondy	2,5	39000				100							oui	8,8			210		
Bonneuil-sur-Marne	4	37000		15		54	31						non			36,5	210		
Cachan	4,5	45 000				10	90						non			13,1	30		
Champigny-sur-Marne	5	59000					100						oui	5,8	19,5	30 (extrapolation)		gaz non renseigné	
Chevilly-la-rue	25	132296		0,5		1,2	55				récupération co-génération	43,3	oui	9,8	24,3	100			
Clichy	3	160000	5			40					raccord CPCU	55	non				250		
Clichy-sous-Bois	5,7	46637				81,77	18,23						oui	6,8	17,4		170		
Colombes	1,7	31500				100							non				280		
Courbevoie	7,5	57400				100							non				280		
Créteil	23,9	316000				63	16	1			récupération co-génération	20	oui	8	19,6		220		
Fontenay-sous-Bois																	?		
Fresnes (nord)	2,6	14020		2,33		57,83	39,84						oui	7,5	16,6		130		
Fresnes (sud)	7	45940		2,33		57,83	39,84						oui	7,5	16,6		130		
Gennevilliers	1	85705		1,35		97,73					récupération co-génération	0,92	oui	5			280		
Ivry-sur-Seine	4,5	56000		5		95							non						
La Courneuve	3,5	66202				40,5	52				récupération co-génération	7,5	oui	5	13,8		130		
La-défense	20	340000	100										non				400		
Le Blanc-Mesnil	3	33100		2		19	79						non			19,9	60		
Le Plessis-Robinson (zipac)	4,6	25880		12,5		87,5							non				290		
Levallois-Perret (lem)	6,6	48000						100					non				250	100% clichy on néglige la zone non renseignée	
Levallois-Perret (zac)	7,2	63870	0,76			97,91					N.C.	1,33	non				280		
Maisons-Alfort 1	2	59857	3,02			26,14	64,48				récupération co-génération	6,36	oui	10	16,4		100	la moyenne pondérée des deux vaut :	
Maisons-Alfort 2	3	43058		8,87			86,61				récupération co-génération	4,52	oui	5,5	18,4		50	80	
Meudon	5	108310	2,5			97,5							oui	6,8			220		
Neuilly-sur-Marne	5,2	65000	33			67							non				320		
Orly-choisy	9,5	89000	24,1	1,6			74,3						non			21,5	100		
Paris	420	4800000	9		17	26		48					oui	250			200	rendement distribution 80% cogé 51%/31%	
Puteaux	7,5	67620	96,27			3,73							oui	5			390		
Rungis	29		0,22			5,42		94,36					non				20	extrapolation	
Saint-Denis	43	320000	55			18					récupération co-génération	27	oui	43			330	cogé 51%/31%	
Sevran (rougemont)	5	52650				100							oui	8			210		
Sucy-en-Brie	2	24000					95				N.C.	5	non		28,6		10	hypothèse de cogé	
Suresnes	5	33600	20,8			64					récupération co-génération	15,2	oui	5			260		
Thiais	3	40000				7	67				N.C.	32	non		31,6		70	hypothèse de cogé	
Tremblay-en-France	2	46650				8	92						non			18,4	30		
Villeneuve-la-Garenne	2	23300		5		95							oui	2,6			220		
Villeneuve-Saint-Georges	6	45900				21,3	78,39				récupération co-génération	0,31	oui	4	10		60		
Vitry-choisy	30	209000	62		30						chaleur industrielle	8	non				380	chaleur industrielle prise égale à 0gCO ₂ /kWh	
Massy-antony	24	233864	1,89		52,2		45,59						non				250		
Légende			PNAQ		géothermie														

ANNEXE 3 : formules de calcul

Les formules de calcul utilisées sont données ci-dessous :

- Cas où il y a à la fois des chaufferies gaz et de cogénération :

$$F = \frac{10^{-2}}{0,93} \left(\frac{1}{0,86} \sum_{\text{fossile}} f_i x_i + \frac{55}{COP} x_{\text{géo}} + \frac{1}{\eta_{th}} (f_{\text{gaz}} - \eta_{\text{élect}} \cdot 400) x_{\text{cogé}} \right)$$

- Cas où tout le gaz est cogénéré :

$$F = \frac{10^{-2}}{0,93} \left(\frac{1}{0,86} \sum_{\substack{\text{fossile} \\ (\text{hors gaz})}} f_i x_i + \frac{55}{COP} x_{\text{géo}} + \frac{1}{\eta_{th}} (f_{\text{gaz}} - \eta_{\text{élect}} \cdot 400) x_{\text{gaz}} \right)$$

Où :

F désigne les émissions de CO du réseau par kWh vendu en sous-station, en gCO₂/kWh

f_i est le facteur d'émissions du combustible fossile i , en gCO₂/kWh

x est la part de l'énergie dans l'approvisionnement total, en %

i désigne l'énergie fossile utilisée (fioul lourd, fioul domestique, gaz, charbon)

η_{th} le rendement de la cogénération en production de chaleur

$\eta_{\text{élect}}$ le rendement de la cogénération en production d'électricité

Sigles

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

DGEMP : Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières

IFP : Institut Français de Pétrole

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

MINEFI : Ministère de l'Économie et des Finances

PNAQ : Plan National d'Affectation de Quotas

SNCU : Syndicat Nationale du Chauffage Urbain

Viaseva et Amorce : sont des organismes de promotion des réseaux de chaleur constitués d'exploitants et de collectivités territoriales

Bibliographie

[1] *Services de la direction générale des travaux*, 1937.

[2] *Enquête chauffage urbain*. SNCU, 2002.

[3] *20 ans de chauffage dans les résidences principales en France de 1982 à 2002*. Observatoire de l'énergie, octobre 2004.

[4] *District Heat in Europe*. Euroheat & Power, 2003.

[5] *Programmation pluriannuelle des investissements de production électrique, période 2005-2015*. MINEFI, 2006.

[6] *Les réseaux de chaleur*. Henry Prevot, Conseil général des Mines, 2006.

[7] *Évaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles*. IFP, 2001.

[8] *Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France*. ADEME, 2005.

[9] *District Heating and Cooling in the United States: Prospects and Issues*.

Commission on Engineering and Technical Systems, 1985.