



EVALUATION PROSPECTIVE 2020-2050 DE LA CONTRIBUTION DU SECTEUR BIOMASSE ENERGIE AUX EMISSIONS NATIONALES DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES

Synthèse

Novembre 2009

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par le CITEPA et Energies Demain (Contrat n°0801C0041)

Coordination technique : Erwan Autret, Service Bioressources - Direction Productions et Energies Durables – ADEME (Angers)

Remerciements : L'équipe de rédaction du rapport tient à remercier les membres du comité de pilotage de cette étude pour leur clairvoyance :

- Isabelle Derville, Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (MEEDDM)
- Martine Leclercq, Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (MEEDDM)
- Yann Ménager, Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (MEEDDM)
- Jean-Louis Bal, ADEME
- Joëlle Colosio, ADEME
- Jean-Christophe Pouet, ADEME

Nous tenons également à adresser notre reconnaissance à l'ensemble des acteurs du secteur biomasse énergie qui ont accepté de répondre à nos sollicitations.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

<http://www.ademe.fr>

Sommaire

1	CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE	6
1.1	BIOMASSE ENERGIE ET QUALITE DE L'AIR	6
1.2	BIOMASSE ENERGIE ET LUTTE CONTRE LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE	10
1.3	OBJECTIF DE L'ETUDE.....	11
2	APPROCHE ADOPTEE	12
2.1	UN MODELE GLOBAL	12
2.2	LA NECESSITE DE TERRITORIALISER LES EMISSIONS	12
3	ETAT DE REFERENCE 2005	14
3.1	RECONSTITUTION DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES	14
3.1.1	<i>Secteurs étudiés</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Niveaux de détails atteints.....</i>	<i>14</i>
3.2	MISE A JOUR DES FACTEURS D'EMISSIONS	15
3.3	RESULTATS OBTENUS POUR L'ANNEE 2005	18
3.3.1	<i>Consommations d'énergie en 2005.....</i>	<i>18</i>
3.3.2	<i>Emissions de polluants atmosphériques en 2005</i>	<i>20</i>
3.3.3	<i>Zoom sur le secteur résidentiel pour l'année 2005.....</i>	<i>29</i>
4	PROSPECTIVE 2020-2050	33
4.1	DEFINITION DU MODELE PROSPECTIF.....	33
4.2	HYPOTHESES PRINCIPALES DE CHACUN DES SCENARIOS	35
4.2.1	<i>Eléments de cadrage.....</i>	<i>35</i>
4.2.2	<i>Hypothèses.....</i>	<i>35</i>
4.3	RESULTATS DES SCENARIOS PROSPECTIFS 2020-2050	37
4.3.1	<i>Consommations d'énergie en 2020-2050.....</i>	<i>37</i>
4.3.2	<i>Emissions de polluants atmosphériques en 2020-2050.....</i>	<i>43</i>
4.3.3	<i>Systèmes de traitement des NOx et coûts associés</i>	<i>51</i>
5	CONCLUSION.....	54

Glossaire

AASQA : Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.
As : Arsenic
BaA : Benzo(a)anthracène
BahA : Benzo(a,h)anthracène
BaP : Benzo(a)pyrène
BbF : benzo(b)fluoranthène
BghiPe : Benzo(g,h,i)perylène
BkF : benzo(k)fluoranthène
Cd : Cadmium
CEE/NU : Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies
CEREN : Centre d'Études et de Recherches Economiques sur l'Énergie, groupement d'intérêt économique créé par les opérateurs énergétiques nationaux et l'ADEME
CH4 Méthane
CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
CO : Monoxyde de Carbone
CO2 : Dioxyde de Carbone
COV : Composés Organiques Volatils
COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
Cr : Chrome
Cu : Cuivre
DGEC : Direction générale de l'énergie et du climat
EACEI : Enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie
EPA : *Environmental Protection Agency*
FluorA : Fluoranthène
GES : gaz à effet de serre
H1, H2, H3 : zones climatiques définissant des regroupements homogènes de températures au sein du territoire pour les deux premières réglementations thermiques. H1 représente 51 départements les plus froids, H2 36 départements et 9 pour H3 qui est la zone la plus chaude.
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
Hg : Mercure
IndPy : indeno(1,2,3-cd)pyrène
INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
Mg : millions de grammes, soit une tonne
MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer
N2O : protoxyde d'azote
NAPFUE : *Nomenclature for Air Pollution of FUEls*
NCE : Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et Consommations d'Énergie. Nomenclature utilisée lors de l'Enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie.
Ni : Nickel
Pb : Plomb
PCDD/F : Dioxine/Furanes (ou polychlorodibenzodioxines/furanes)
PM10 : Particules ayant un diamètre inférieur à 10 µm
PM2,5 : Particules ayant un diamètre inférieur à 2,5 µm
PM1,0 : Particules ayant un diamètre inférieur à 1,0 µm
PPI : Programmation Pluriannuelle des Investissements
SCR : réduction catalytique sélective (*selective catalytic reduction*)
Se : Selenium
SNCR : réduction non catalytique sélective (*selective non catalytic reduction*)
SO2 : dioxyde de soufre
tep : tonne équivalent pétrole (1 tep = 11630 kWh)
TSP : Particules totales (*Total Suspended Particles*)
ZAS : Zones Administratives de Surveillance de la qualité de l'air
ZAS 1 : Zone Administrative de Surveillance de plus de 250 000 habitants
ZAS 2 : Zone Administrative de Surveillance entre 50 000 et 250 000 habitants
ZAS 3 : Zone Administrative de Surveillance de moins de 50 000 habitants
ZAS 4 : Zone Administrative de Surveillance en Zone Industrielle : Le Havre, Port Jérôme et Fos sur Mer
Zn : Zinc

Résumé

Le développement des utilisations énergétiques de la biomasse est une des solutions à mettre en œuvre pour atteindre des objectifs fixés par les pouvoirs publics dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. La combustion de la biomasse a également un impact sur la pollution atmosphérique, qui doit être réduite conformément aux engagements nationaux d'amélioration de la qualité de l'air.

L'ADEME a confié à Energies Demain et au CITEPA la réalisation d'une étude prospective 2020-2050 afin d'évaluer les conditions techniques et économiques d'un développement maîtrisé de la biomasse énergie permettant de respecter conjointement les engagements pris pour atténuer le réchauffement climatique et améliorer la qualité de l'air.

L'étude prend en compte la dimension territoriale de la pollution atmosphérique grâce à une répartition locale des consommations d'énergie (gaz, fioul, biomasse, ...) destinées à la production de chaleur et d'électricité dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industriel et chauffage urbain. Les émissions nationales sont caractérisées finement à partir des facteurs d'émission des différentes sources et tiennent compte de la mise en place éventuelle de traitements spécifiques tels que le dépoussiérage par filtre à manches, électrofiltre ou encore la réduction sélective des oxydes d'azote.

Les émissions prospectives de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O), de composés organiques (CO, COVNM, PCDD/F, 8HAP), de particules (TSP, PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0}), de NO_x, de SO₂ et de métaux (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) sont quantifiés par secteur émetteur ainsi que par zone administrative de surveillance de la qualité de l'air. L'étude montre que le développement conjoint de la biomasse énergie et de la qualité de l'air est possible. Elle en précise les conditions techniques et économiques de mise en œuvre.

1 Contexte et objectif de l'étude

1.1 Biomasse énergie et qualité de l'air

Comme toute combustion, celle du bois est émettrice de particules (TSP, PM10, PM2,5 et PM1,0), de NO_x, de CO, de COVM mais aussi de HAP et de métaux lourds. Certains de ces polluants peuvent être émis en grande quantité dans la combustion du bois en foyers domestiques.

Certains de ces polluants sont des indicateurs de la qualité de la combustion. Si cette combustion n'est pas optimale, leurs émissions augmentent. Il s'agit de composés imbrûlés dont la formation est favorisée lorsque la combustion n'est pas complète.

Il est nécessaire que le bois soit brûlé dans de bonnes conditions pour limiter les émissions polluantes. Ces conditions particulières sont notamment les suivantes :

- La qualité du combustible : il est nécessaire d'utiliser un bois sec et non traité ;
- La technologie et le réglage de l'appareil de combustion : afin que la combustion soit la moins émettrice possible, il est nécessaire de respecter la règle des 4T:
 - o Teneur en oxygène : Il est nécessaire d'apporter suffisamment d'oxygène dans les différentes zones de combustion ; de façon générale les émissions sont limitées quand une double entrée d'air est utilisée : l'air primaire est utilisé pour entretenir la pyrolyse du bois (gazéification) et oxyder le charbon et l'air secondaire est utilisé pour brûler l'ensemble des gaz produits par la pyrolyse.
 - o Température : une température suffisamment haute doit être appliquée dans toutes les parties de la chambre de combustion afin de permettre une bonne combustion et d'éviter la présence de zones froides propices à la formation de composés imbrûlés de type CO, COV, TSP, etc.
 - o Turbulence : un bon mélange entre l'air comburant et le combustible est recommandé pour assurer une bonne combustion. En effet, l'oxygène de l'air doit être en contact avec le combustible pour qu'il puisse y avoir combustion.
 - o Temps de séjour : les gaz doivent rester au minimum une à deux secondes dans la chambre de combustion afin d'accroître les probabilités de rencontre entre le comburant et le combustible.

Lorsque la combustion de la biomasse ne respecte pas ces conditions, d'importantes quantités de composés imbrûlés sont émises.

Les technologies employées pour certains appareils domestiques (ex : les foyers ouverts) ne respectent pas parfaitement la règle des 4T et certains particuliers n'utilisent pas du bois de bonne qualité. Ceci peut expliquer les importantes émissions de composés imbrûlés relevées dans le secteur domestique présentées dans les tableaux suivants.

Les tableaux 1, 2 et 3 présentent l'historique des émissions depuis 1990 dues à la combustion du bois et des résidus de récolte dans le résidentiel tertiaire, le chauffage urbain et l'industrie.

Les émissions de polluants atmosphériques de la combustion du bois ont tendance à baisser. Cette tendance est due essentiellement à la mise sur le marché d'appareils domestiques performants qui présentent une meilleure combustion et une meilleure efficacité énergétique (avec notamment le respect de la règle des 4 T), d'où des émissions de composés imbrûlés plus faibles mais des émissions de NO_x qui peuvent devenir plus importantes. La baisse des émissions de particules, due à la rénovation du parc, est mise en évidence dans la figure 1.

Tableau 1 : Emissions dues à la combustion du bois et des résidus de récolte (NAPFUE 111 et 117) dans le résidentiel tertiaire (hors chauffage urbain)¹

Emissions dues à la combustion du bois et des résidus de récolte (NAPFUE 111 et 117) dans le résidentiel tertiaire (hors chauffage urbain)							
Polluant	Unité	1990	1995	2000	2005	2006	2007
CO2	Gg	33473	32850	30985	30016	29108	27827
CH4	Mg	177976	177181	141762	100461	90000	78916
N2O	Mg	1455	1428	1347	1305	1266	1210
GES	kt eq CO2/an	37662	37014	34379	32530	31390	29859
As	kg	3441	3380	2809	2149	1963	1769
BaA	kg	17600	15839	12451	9027	8353	7470
BaHA	kg	1015	913	718	520	481	431
BaP	kg	11005	9903	7785	5644	5222	4670
BbF	kg	12322	11088	8717	6320	5848	5229
BGHIPE	kg	3255	2929	2303	1669	1545	1381
BkF	kg	7537	6783	5332	3866	3577	3199
Cd	kg	507	498	414	317	289	261
CO	Mg	2441212	2408199	2075234	1706701	1593507	1461841
COVNM	Mg	537206	534717	428265	304175	272703	239306
Cr	kg	17025	16723	13898	10633	9711	8750
Cu	kg	11229	11030	9167	7013	6405	5771
FLUORA	kg	69917	62917	49461	35858	33180	29673
Hg	kg	290	285	237	181	165	149
INDPY	kg	6410	5768	4534	3287	3042	2720
Ni	kg	3985	3914	3253	2489	2273	2048
NOx	Mg	22383	21948	20842	20562	19955	19229
Pb	kg	32601	32022	26613	20362	18595	16755
PCDD-F	mg	35986	35356	29298	22210	20257	18168
Se	kg	2536	2491	2070	1584	1446	1303
SO2	Mg	7277	7141	6736	6525	6328	6049
TSP	Mg	222735	223740	183665	139027	127079	113978
Zn	kg	105046	103182	85752	65609	59918	53989

Tableau 2 : Emissions dues à la combustion du bois et des résidus de récolte (NAPFUE 111 et 117) dans le chauffage urbain²

Emissions dues à la combustion du bois et des résidus de récolte (NAPFUE 111 et 117) dans le chauffage urbain							
Polluant	Unité	1990	1995	2000	2005	2006	2007
CO2	Gg	17,1	61,8	49,3	121,4	196,5	197,5
CH4	Mg	0,6	2,2	1,7	4,2	6,8	6,9
N2O	Mg	0,7	2,7	2,1	5,3	8,5	8,6
GES	kt eq CO2/an	17,4	62,7	50,0	123,2	199,3	200,3
As	kg	1,8	6,4	5,1	12,5	20,3	20,4
BaA	kg	0,2	0,7	0,6	1,5	2,3	2,4
BaHA	kg	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
BaP	kg	0,1	0,5	0,4	0,9	1,5	1,5
BbF	kg	0,1	0,5	0,4	1,1	1,7	1,7
BGHIPE	kg	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4
BkF	kg	0,1	0,3	0,3	0,7	1,1	1,1
Cd	kg	0,3	0,9	0,7	1,8	3,0	3,0
CO	Mg	46,6	168,0	133,8	330,0	534,0	536,8
COVNM	Mg	0,9	3,2	2,6	6,3	10,3	10,3
Cr	kg	8,8	31,6	25,2	62,0	100,4	100,9
Cu	kg	5,8	20,8	16,6	40,9	66,2	66,6
FLUORA	kg	0,8	2,9	2,3	5,7	9,2	9,2
Hg	kg	0,1	0,5	0,4	1,1	1,7	1,7
INDPY	kg	0,1	0,3	0,2	0,5	0,9	0,9
Ni	kg	2,0	7,4	5,9	14,5	23,5	23,6
NOx	Mg	37,3	131,4	90,4	220,0	386,6	371,6
Pb	kg	16,7643	60,5	48,2	118,8	192,2	193,2
PCDD-F	mg	7,5	26,9	21,4	52,8	85,4	85,9
Se	kg	1,3	4,7	3,7	9,2	15,0	15,0
SO2	Mg	3,7	14,1	8,7	21,0	45,9	38,0
TSP	Mg	18,6	64,7	40,0	64,7	142,1	140,1
Zn	kg	54,0	194,9	155,3	382,8	619,4	622,7

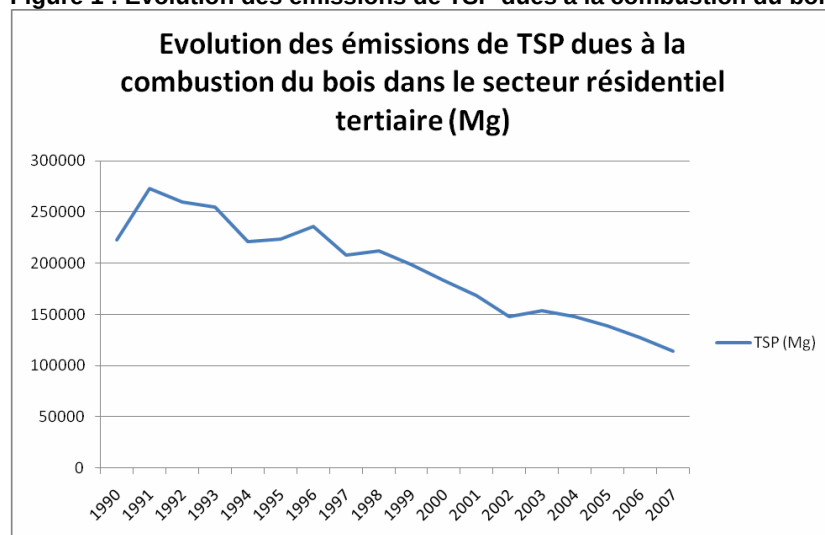
¹ Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – SNIEPA 2009 - CITEPA

² Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – SNIEPA 2009 - CITEPA

Tableau 3 : Emissions dues à la combustion du bois et des résidus de récolte (NAPFUE 111 et 117) sous chaudières dans l'industrie³

Emissions dues à la combustion du bois et des résidus de récolte (NAPFUE 111 et 117) sous chaudières dans l'industrie							
Polluant	Unité	1990	1995	2000	2005	2006	2007
CO2	Gg	3610	2041	2372	3651	3947	4229
CH4	Mg	126	71	83	127	137	147
N2O	Mg	157	89	103	159	172	184
GES	kt eq CO2/an	3661	2070	2406	3702	4003	4289
As	kg	373	211	245	377	408	437
BaA	kg	8	4	5	8	9	9
BaHA	kg	8	4	5	8	9	9
BaP	kg	20	11	13	20	21	23
BbF	kg	43	24	28	44	47	51
BGHIPE	kg	82	47	54	83	90	97
BkF	kg	12	7	8	12	13	14
Cd	kg	55	31	36	56	60	64
CO	Mg	25506	14417	16762	25792	27887	29878
COVNM	Mg	1884	1065	1238	1905	2059	2206
Cr	kg	1844	1042	1212	1865	2016	2160
Cu	kg	1216	688	799	1230	1330	1425
FLUORA	kg	119	68	79	123	133	142
Hg	kg	31	18	21	32	34	37
INDPY	kg	20	11	13	20	21	23
Ni	kg	432	244	284	436	472	506
NOx	Mg	5892	4216	4995	6756	7226	7747
Pb	kg	3532	1996	2321	3571	3861	4137
PCDD-F	mg	1570	887	1032	1587	1716	1839
Se	kg	275	155	181	278	300	322
SO2	Mg	589	870	1254	1397	1548	1327
TSP	Mg	3503	1760	2426	3215	3329	3431
Zn	kg	11380	6432	7478	11507	12442	13330

Figure 1 : Evolution des émissions de TSP dues à la combustion du bois dans le secteur résidentiel tertiaire



³ Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – SNIEPA 2009 - CITEPA

Le tableau 4 permet de relativiser l'importance de ces émissions en les comparant aux émissions totales nationales pour l'année 2005.

Tableau 4 : Part des émissions dues à la combustion de la biomasse bois sur les émissions totales en 2005⁴

Polluant	Part des émissions dues à la combustion de la biomasse sur les émissions totales en 2005
Gaz à effet de serre (GES)	
CH ₄	4%
N ₂ O	1%
SO ₂	2%
Polluants atmosphériques	
NO _x	2%
COVNM	22%
CO	31%
As	25%
Cd	7%
Cr	30%
Cu	5%
Hg	2%
Ni	2%
Pb	20%
Se	13%
Zn	33%
PCDD-F	12%
4HAP*	77%
TSP	12%
PM ₁₀	23%
PM _{2,5}	34%
PM _{1,0}	59%

* Somme des 4 HAP tels que définis par la CEE-NU : benzo(a)pyrène (BaP), benzo(b)fluoranthène (BbF), benzo(k)fluoranthène (BkF), indeno(1,2,3-cd)pyrène

En termes de qualité de l'air ambiant, la part de la pollution atmosphérique imputable à la combustion du bois n'est pas facilement identifiable. En effet, il n'y a pas de traceurs spécifiques de la combustion du bois parmi les polluants « classiques » mesurés par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Les particules ou les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), présents dans les émissions de la combustion du bois, sont également émis par le trafic automobile et d'autres sources anthropiques. Peu d'études ont été menées à ce sujet. Toutefois, plusieurs travaux ont permis d'aboutir à des résultats intéressants :

1. Dans le cadre du programme POLLution des Vallées Alpines (POVA⁵) : les travaux ont permis d'estimer que 10% à 30% des PM₁₀ dans l'air ambiant seraient dues à la combustion du bois dans les vallées alpines ;
2. Concernant les HAP, une étude menée par l'INERIS⁶, a montré l'influence non négligeable du chauffage au bois sur les concentrations en HAP dans l'air ambiant ;
3. Une autre étude menée par l'INERIS avec différentes AASQA a permis de mesurer le levoglucosan, traceur de la combustion du bois, dans plusieurs agglomérations françaises et de mettre en évidence les plus impactées.

Les émissions de la combustion du bois ne peuvent pas être directement reliées aux concentrations de polluants mesurées dans l'air ambiant par les AASQA, étant donnée l'influence des conditions météorologiques et les nombreuses autres sources de polluants.

Signalons que les seuils de concentrations maximales de PM₁₀ imposés par la réglementation qualité de l'air sont aujourd'hui dépassés sur de nombreux sites surveillés, comme le montre le tableau 5.

⁴ Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – SNIEPA 2009 - CITEPA

⁵ Rapport final POVA, Fine et al. (2001) et Schauer et al. (2001)

⁶ Caractérisation des zones non couvertes par le programme pilote HAP : campagne hivernale en Isère – INERIS

⁶ Etude exploratoire sur la présence des traceurs spécifiques de la source « combustion du bois » dans les grandes agglomérations françaises – INERIS - 2007

Tableau 5 : Synthèse des dépassements des valeurs réglementaires des PM10 et PM2,5 dans les régions sensibles en 2007

	Concentrations de PM10			Concentrations de PM2,5		
	Objectif de qualité (moyenne annuelle)	Valeur limite (moyenne annuelle)	Valeur limite (moyenne journalière)	Recommandations de l'OMS (moyenne annuelle)	Valeur cible en 2010 et limite en 2015 (moyenne annuelle)*	Valeur cible en 2010 et limite en 2015 (moyenne annuelle)**
	30 µg/m ³	40 µg/m ³	50 µg/m ³ avec 35 jours de dépassements	10 µg/m ³	15 µg/m ³	25 µg/m ³
Rhône-Alpes	Sites trafics et urbains	Sur 1 site "trafic"	Sites trafics, urbains et industriels	Sites trafics et urbains	Sites trafics et urbains	Sites trafics
Alsace	Sites trafics et urbains		Sites trafics et urbains	Sites trafics et urbains***	Sites trafics***	***
Nord-Pas-de-Calais	Tous types de sites					
Normandie	Sites trafics		Sites trafics	Sites urbains	Sites urbains	
Ile-de-France	Sites trafics et urbains	Sites trafics	Sites trafics et urbains	Sites trafics et urbains	Sites trafics et urbains	Sites trafics

* Valeur fixée dans le cadre du projet de loi du Grenelle de l'Environnement et reprise dans le plan particules

** Directive 2008/50/CE du 28 mai 2008

*** les mesures ne sont pas ajustées

	Dépassements sur plusieurs sites de mesure du seuil
	Dépassements sur 1 site de mesure du seuil
	Pas de dépassement du seuil

1.2 Biomasse énergie et lutte contre le réchauffement climatique

L'utilisation du bois énergie en remplacement de combustibles fossiles permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et donc de lutter contre le changement climatique. En effet, en ce qui concerne la combustion de la biomasse, les émissions de CO₂ ne sont pas comptabilisées dans les inventaires CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatiques). Il est ainsi considéré que tout le CO₂ émis par la combustion de la biomasse est absorbé par photosynthèse par de la biomasse. L'utilisation de la biomasse en remplacement de combustibles fossiles permet donc de lutter contre le changement climatique.

La biomasse est considérée comme une énergie renouvelable. C'est pourquoi de gros efforts de développement de cette énergie ont été prévus par le COMOP 10 (comité opérationnel n°10) du Grenelle de l'environnement et sont repris par la PPI chaleur. Ces objectifs sont donnés dans le tableau 6.

Lors du Grenelle de l'environnement, l'objectif de consommation de 20 Mtep d'énergie renouvelable en 2020 a été fixé. La majeure partie de l'augmentation de la production de chaleur à partir d'énergies renouvelables prévue par le Grenelle de l'environnement est supportée par la filière bois énergie (environ 62 % pour 2020).

Tableau 6 : Objectifs 2012-2020 définis en termes de consommation par le COMOP 10

Energie	Situation 2006	Horizon 2012		Horizon 2020	
		Objectif au 31/12/2012	Supplément à réaliser	Potentiel 2020	Supplément à réaliser
Bois individuel	7400 (5,75 Mlogts)	7400 (7,3 Mlogts)	0 (1,55 Mlogts)	7400 (9 Mlogts)	0 (3,25 Mlogts)
Biomasse	1 400	2 500	1 100	5 200	3 800
<i>dont bâtiments</i>	100	300	200	800	700
<i>dont réseaux de chaleur collectif/tertiaire</i>	100	300	200	1 200	1 100
<i>dont industrie/process</i>	1 200	1 900	700	3 200	2 000
Biomasse chaleur cogénération	0	540	540	2 400	2 400
Géothermie profonde	130	195	65	500	370
Géothermie intermédiaire	50	100	50	250	200
Pompe à chaleur individuelle	200 (0,075 Mlogts)	1 200 (1,245 Mlogts)	1 000	1 600 (2,0 Mlogts)	1 400
Solaire thermique individuel	17 (0,085 Mlogts)	150 (0,730 Mlogts)	133 (0,645 Mlogts)	817 (4,285 Mlogts)	800 (4,2 Mlogts)
Solaire collectif	10	35	25	110	100
Part ENR des UIOM et bois DIB	400	470	70	900	500
Biogaz	55	60	5	555	500
Total	9 662	12 650	2 988	19 732	10 070

Mlogts : millions de logements

1.3 Objectif de l'étude

C'est dans le contexte du respect du double engagement d'amélioration de la qualité de l'air et de lutte contre le changement climatique que l'ADEME a confié à Energies Demain et au CITEPA la réalisation d'une étude prospective à l'horizon 2020-2050. Cette étude a pour but d'évaluer les conditions techniques et économiques d'un développement maîtrisé de la biomasse énergie permettant de respecter conjointement les engagements pris pour atténuer le réchauffement climatique et améliorer la qualité de l'air. Un modèle permettant d'estimer les futures émissions dues à la combustion et une méthode permettant d'interpréter les résultats de ce modèle en vue d'évaluer le respect de ce double objectif ont ainsi été développés.

L'étude prend en compte la dimension territoriale de la pollution atmosphérique grâce à une répartition géographique des consommations d'énergie (gaz naturel, fioul domestique, biomasse, ...) destinées à la production de chaleur et d'électricité dans les secteurs résidentiels, tertiaires, industriels et le chauffage urbain. Les émissions de polluants en métropole sont caractérisées à partir des facteurs d'émission des différentes sources et tiennent compte de la mise en place éventuelle de traitement spécifique tel que le dépoussiérage par filtre à manches ou électrofiltre et la réduction des NOx par réduction catalytique sélective (SCR) ou par réduction non catalytique sélective (SNCR).

Les émissions prospectives de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O), de composés organiques (CO, COVNM, PCDD/F, HAP), de particules (TSP, PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0}), de NOx, de SO₂ et de métaux (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) sont estimées par secteur émetteur ainsi que par zone administrative de surveillance de la qualité de l'air. L'étude a pour but d'examiner si le développement de la biomasse énergie (pour respecter les engagements Grenelle en matière de lutte contre l'effet de serre) et le respect de la qualité de l'air est possible. Elle en précise également les conditions techniques et économiques de mise en œuvre.

2 Approche adoptée

2.1 Un modèle global

L'option retenue pour répondre à la problématique posée a été la création d'un modèle dynamique en mesure d'évaluer les impacts en termes de consommations énergétiques, d'émissions de polluants atmosphériques et d'émissions de GES des différentes alternatives de développement de la biomasse énergie.

Ce modèle a été élaboré dans le souci de permettre la simulation, au pas de temps annuel, des émissions de GES et autres polluants atmosphériques liées à l'ensemble des consommations énergétiques et non pas exclusivement à celles des systèmes utilisant la biomasse énergie. Ce choix méthodologique s'explique par la nécessité de situer les émissions de polluants atmosphériques de ces systèmes par rapport au total de celles du périmètre étudié afin d'obtenir une évaluation pertinente des impacts liés au développement de la biomasse énergie. Il permet en effet, par exemple, de prendre en compte à la fois les émissions induites par l'utilisation de systèmes de chauffage à la biomasse mais également les émissions évitées (ou générées) par le remplacement d'autres systèmes de chauffage au profit de la biomasse énergie.

2.2 La nécessité de territorialiser les émissions

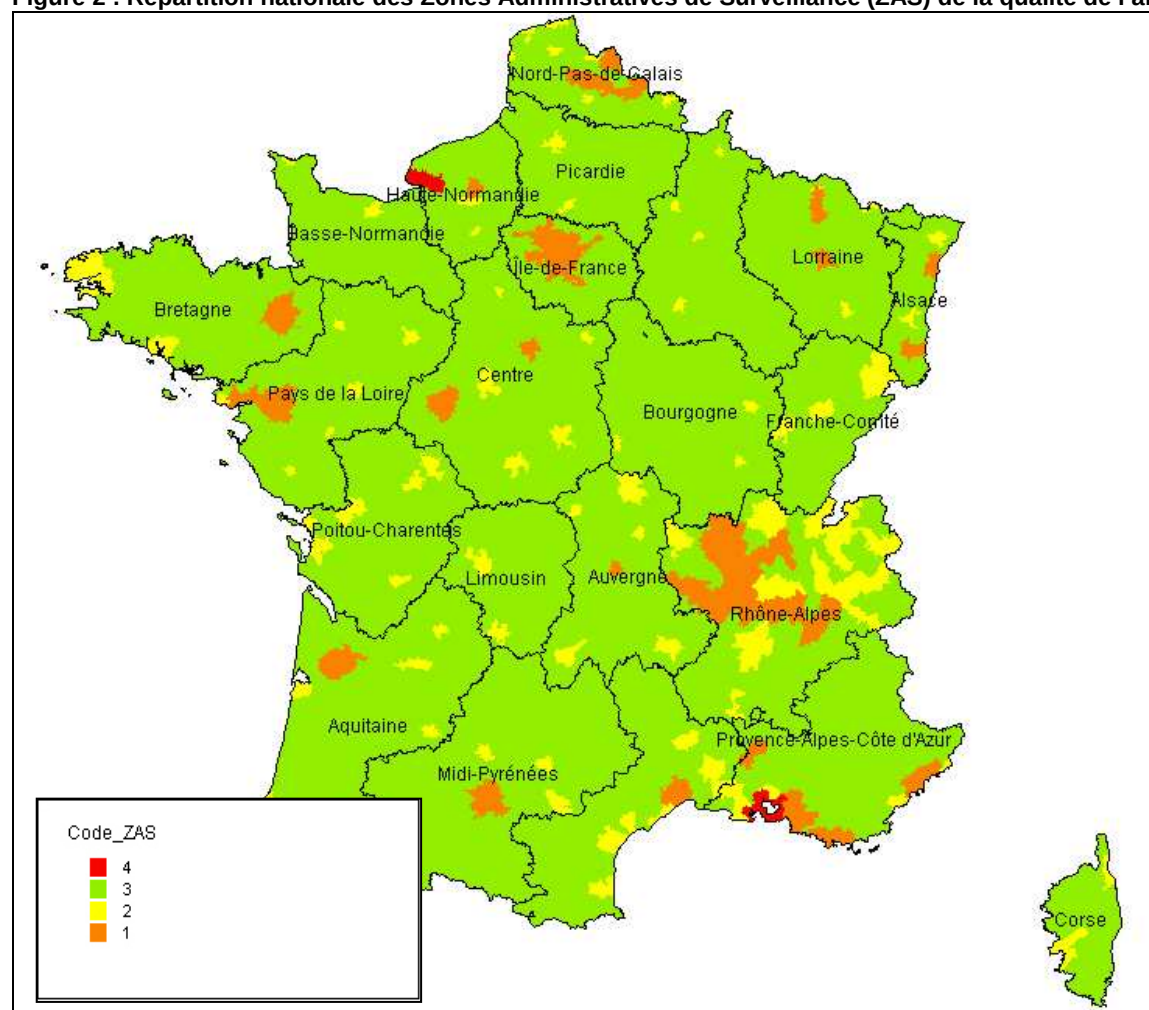
Contrairement au réchauffement climatique dont il est possible d'analyser les causes et conséquences à une échelle globale, la pollution atmosphérique est quant à elle une problématique essentiellement locale. Cette caractéristique du phénomène étudié a rendu nécessaire la reconstitution des consommations énergétiques et des émissions de polluants atmosphériques associées à une échelle territoriale fine.

Plus précisément, l'échelle de traitement définie par le comité de pilotage de l'étude est celle de la Zone Administrative de Surveillance de la qualité de l'air. Il s'agit de zones réglementaires établies par la directive européenne 2008/50/CE. Leur définition est principalement liée à la taille des agglomérations présentes sur le territoire considéré comme en témoigne le tableau 7 et la figure 2.

Tableau 7 : Zones Administratives de Surveillance (ZAS) de la qualité de l'air (source ADEME)

Code ZAS	Libellé	Population
1	Zone Agglo	Plus de 250 000 habitants
2	Zone Urbaine Régionale	Entre 50 000 et 250 000 habitants
3	Zone Régionale	Moins de 50 000 habitants
4	Zone Industrielle	Le Havre, Port Jérôme et Fos sur Mer

Figure 2 : Répartition nationale des Zones Administratives de Surveillance (ZAS) de la qualité de l'air



3 Etat de référence 2005

La réalisation de l'état de référence pour l'année 2005 repose sur un modèle permettant de décrire finement les consommations d'énergie des secteurs résidentiel, tertiaire, industriel, chauffage urbain et production d'électricité ainsi que les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques associées. Le choix de l'année 2005 est justifié par la disponibilité de données suffisantes, permettant de bien caler le modèle avec un historique de données. Ce chapitre décrit les principales composantes du modèle et les résultats des consommations et de la qualité de l'air pour l'année 2005. Cet état de référence servira ensuite de point de départ aux simulations prospectives 2020-2050 (chapitre 4).

3.1 Reconstitution des consommations énergétiques

3.1.1 Secteurs étudiés

Les secteurs dont les consommations d'énergie ont été reconstituées dans le cadre de l'élaboration de l'état de référence sont les suivants :

- **Résidentiel** : le périmètre considéré comprend à la fois le secteur domestique et les chaufferies collectives au bois destinés à l'usage résidentiel. Il concerne uniquement les consommations énergétiques liées au chauffage des résidences principales (les résidences secondaires sont hors périmètre de l'étude) ;
- **Tertiaire** : le périmètre considéré concerne les consommations d'énergie liées au chauffage du secteur tertiaire ;
- **Industrie** : le périmètre considéré concerne les consommations de combustibles du secteur industriel ;
- **Chauffage urbain** : le périmètre considéré concerne les consommations d'énergie des unités de production de chauffage urbain ;
- **Production électrique**⁷ : le périmètre considéré concerne les consommations d'énergie des unités de production d'électricité.

Afin d'éviter les doubles comptes, une attention toute particulière a été accordée à la définition des périmètres des secteurs utilisés pour la constitution de l'état de référence notamment concernant l'affectation sectorielle des chaufferies dites collectives.

La définition des périmètres a été réalisée dans le souci d'imputer à chacun de ces secteurs uniquement ses émissions directes. Par exemple, bien que les consommations de chauffage des résidences principales reliées à un réseau de chaleur urbain soient liées à une demande du secteur résidentiel, les émissions induites par les consommations d'énergie nécessaires à la production de chaleur correspondante sont comptabilisées dans le périmètre du chauffage urbain et non pas celui du résidentiel.

3.1.2 Niveaux de détails atteints

Dans un souci d'identification des enjeux majeurs et des leviers d'actions associés, la structure des consommations énergétiques et des émissions de polluants atmosphériques associées a été décrite de manière fine selon le jeu de déterminants considéré comme le plus approprié. Les méthodologies adoptées et les niveaux de détails atteints pour la définition des consommations énergétiques ont été conditionnés par les données disponibles. Le tableau 8 fait état de l'échelle territoriale de description atteinte, des sources de données utilisées et des discriminants de consommations disponibles pour chacun des secteurs étudiés.

La reconstitution des consommations énergétiques a été réalisée à l'échelle de la commune pour les secteurs résidentiel, tertiaire et chauffage urbain, afin de permettre une agrégation des résultats à l'échelle de la ZAS⁸. Par manque de données disponibles, ce niveau de détails n'a pas pu être obtenu pour les secteurs de l'industrie et de la production électrique.

⁷ Ce secteur n'ayant pas fait l'objet d'une simulation prospective, les données de l'état de référence concernant ce secteur ne sont pas présentées dans cette synthèse. Le lecteur est invité à se référer au rapport de l'étude pour plus d'informations sur le sujet.

⁸ Voir 2.2 la nécessité de territorialiser les émissions.

Tableau 8 : Niveaux de détails atteints pour la constitution de l'état de référence

Echelle territoriale de description	Secteur	Données utilisées	Discriminants disponibles
Commune	Résidentiel domestique	ENERTER Résidentiel, Bilan national du bois de chauffage (CEREN, 2006) et Bilans régionaux du bois de chauffage (CEREN, 2006)	Type de logement (Maison, Appartement)
			Période de construction des logements (Avant 1949, 1949-1975, 1976-1989, 1990-2005)
			Energie de chauffage principale du logement (Chauffage urbain, Gaz naturel, Fioul, Electricité - Effet Joule, GPL, Charbon, Bois, Electricité - PAC)
			Energie de chauffage secondaire du logement (Chauffage urbain, Gaz naturel, Fioul, Electricité - Effet Joule, GPL, Charbon, Bois, Electricité - PAC)
	Résidentiel collectif	ENERTER Résidentiel, Base de données de subvention de l'ADEME ⁽ⁱ⁾	Usage du bois dans le logement (Base seule, Base associée, Appoint régulier, Appoint exceptionnel)
			Type de système de chauffage au bois utilisé (Individuel : Chaudière, Cuisinière, Poêle, Foyer fermé, Foyer ouvert, Cogénération – Collectif : Chaudière, Cogénération)
			Type de combustible bois utilisé (Bûches, Granulés, Plaquettes, Biomasse agricole)
	Tertiaire	ENERTER Tertiaire, Base de données de subvention de l'ADEME	Branche (Administration, Bureaux, Cafés-Hôtels-Restaurants, Commerce, Enseignement, Habitat communautaire, Santé, Sports Loisirs Culture, Transports)
			Energie de chauffage (Chauffage urbain, Gaz, Fioul, Electricité - Effet Joule, Electricité - PAC, Bois, Autres)
			Type de système de chauffage au bois utilisé (Chaudière, Cogénération)
	Chauffage urbain	Enquête SNCU ⁽ⁱⁱ⁾ , Données CIBE ⁽ⁱⁱⁱ⁾ , ViaSeva, ENERTER Résidentiel, ENERTER Tertiaire, Base de données de subventions de l'ADEME	Type de combustible bois utilisé (Bûches, Granulés, Céréales, Biomasse agricole)
			Energie (UIOM, Gaz, Fioul, Géothermie, Charbon, Bois, Autres)
Région	Industrie	Enquête EACEI ^(iv) , Base SIRENE	Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie (NCE) Energie (Autres produits pétroliers, Fioul, Gaz, GPL, Houille - Lignite - charbon pauvre - Coke de houille, Bois et sous-produits du bois, Liqueurs noires, Autres)
France	Production électrique	Données SceGES ^(vi)	Energie (Hydraulique, Eolien, Autres ENR, Nucléaire, Gaz, Charbon, Fioul)

(i) La base de données utilisée répertorie les subventions attribuées par l'ADEME pour l'installation de chaufferies au bois. Elle inclut entre autres la puissance de l'installation, sa consommation de bois et le secteur de destination de la chaleur. Une consolidation des données issues de cette base a été réalisée dans le cadre de cette étude.

(ii) Syndicat National du Chauffage Urbain et de la climatisation urbaine (SNCU)

(iii) Comité Interprofessionnel du Bois Energie (CIBE)

(iv) Enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie (EACEI)

(v) Système d'Identification du Répertoire des ENTreprises et de leurs Etablissements (SIRENE)

(vi) SceGES est un outil de scénarisation prospective développé notamment par l'Ecole des Mines de Paris, le CITEPA et Energies Demain pour le compte de la Direction Générale de l'Énergie et du Climat.

3.2 Mise à jour des facteurs d'émissions

La traduction en émissions de GES et de polluants atmosphériques des consommations énergétiques reconstituées au travers des bilans réalisés a nécessité l'emploi de facteurs d'émissions distincts selon l'énergie utilisée et le secteur considéré. Dans le cadre de cette étude, le CITEPA a entrepris conjointement avec le Ministère de l'Ecologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) une mise à jour des facteurs d'émissions des systèmes de chauffage utilisateurs de biomasse énergie. Pour le secteur résidentiel, cette mise à jour des facteurs d'émissions a été complétée par un travail de reconstitution de la pyramide des âges des systèmes de chauffage au bois.

Actuellement, en ce qui concerne le chauffage domestique au bois, les facteurs d'émissions utilisés par le CITEPA dans les inventaires d'émissions nationaux sont différenciés suivant 4 groupes d'équipements : les foyers ouverts, les foyers fermés et inserts, les poêles et cuisinières, et enfin les chaudières. A l'exception des foyers ouverts, ces groupes sont eux-mêmes divisés en 3 catégories :

1. Appareils anciens désignant les appareils vendus avant 1996,
2. Appareils récents désignant la majorité des appareils vendus entre 1996 et 2005,
3. Appareils performants.

Les facteurs d'émissions employés pour la combustion du bois dans le secteur domestique sont issus de divers travaux menés (études du CITEPA, de l'INERIS, de l'EPA, etc.) et des discussions menées avec

Erdyn lors de la réalisation par ce cabinet de la précédente étude biomasse prospective pour l'ADEME.

En ce qui concerne la combustion du bois dans le secteur collectif et industriel, les facteurs d'émission utilisés actuellement pour les inventaires nationaux d'émissions de polluants atmosphériques proviennent de résultats de différentes mesures effectuées sur une cinquantaine de chaudières. En ce qui concerne les grandes installations de combustion (de puissance thermique supérieure à 50 MW), les émissions sont basées sur les inventaires des Grandes Installations de Combustion.

Lors de cette étude, les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA pour la combustion du bois ont été comparés aux données de la littérature la plus récente. Cette comparaison a permis de confirmer que la quasi totalité des facteurs d'émissions utilisés dans le cadre des inventaires d'émissions nationaux par le CITEPA sont globalement cohérents avec les données de la littérature. Cependant, en ce qui concerne le facteur d'émission employé pour le SO₂, à savoir 20 g/GJ pour toutes les installations de combustion du bois, celui-ci semble relativement élevé face aux valeurs mesurées par l'ADEME lors de récentes campagnes de mesures (valeurs très inférieures à 10 g/GJ). C'est pourquoi **il a été convenu d'abaisser le facteur d'émission du SO₂ à 10 g/GJ pour toutes les installations de combustion du bois**. En effet, les émissions de SO₂ ne dépendant que de la quantité de soufre présent dans le bois et non des conditions de combustion, le facteur d'émission du SO₂ est identique quelque soit l'installation.

D'autre part, la valeur du facteur d'émissions des TSP utilisée dans l'inventaire national des émissions pour l'ensemble des chaufferies biomasse (< 50MW) est de 100 g/GJ. Ce facteur d'émissions correspond à une moyenne de facteurs d'émissions de chaufferies bois équipées de différents systèmes de traitement des poussières, à savoir principalement des cyclones ou multicyclones et occasionnellement des filtres à manche et des électrofiltres. Si cette valeur représente relativement bien les émissions du parc actuel, elle n'est absolument pas représentative des performances des chaufferies aujourd'hui mises en fonctionnement (10 g/GJ en moyenne). Ce résultat provenant de mesures réalisées pour la plupart sur des installations relativement récentes et ayant de bonnes performances, et afin de prendre en compte dans l'étude prospective les émissions d'installations qui pourraient avoir des performances sensiblement plus basses, il a été considéré que **le facteur d'émissions de TSP à appliquer à toutes les nouvelles installations** (création ou remplacement d'une chaufferie existante) est celui correspondant à la valeur limite d'émission de référence de 30 mg/Nm³ en 2010, **soit 17 g/GJ**.

Pour information, les facteurs d'émission utilisés pour les autres combustibles ont été pris égaux à ceux utilisés dans les inventaires nationaux d'émissions de polluants atmosphériques.

Les tableaux suivants présentent les facteurs d'émission employés. Il est à noter que les émissions de CO₂ dues à la combustion de la biomasse ne sont pas prises en compte pour les raisons citées précédemment, d'où un facteur d'émission pris égal à 0 kg/GJ. Pour information, si ces émissions étaient prises en compte, le facteur d'émission employé serait de 92 kg/GJ.

Tableau 9 : Résidentiel : Facteurs d'émissions des systèmes domestiques de chauffage au bois utilisés dans cette étude

Facteurs d'émission en énergie entrante	Chaudières			Poêles			Cuisinières			Inserts			Foyers ouverts
	Avant 1996	Après 1996	Performant	Avant 1996	Après 1996	Performant	Avant 1996	Après 1996	Performant	Avant 1996	Après 1996	Performant	
CH ₄ (g/GJ)	330	100	17	530	130	80	530	130	80	530	130	80	565
CO ₂ (kg/GJ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N ₂ O (g/GJ)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
SO₂ (g/GJ)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
NO _x (g/GJ)	60	60	90	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
VNM (g eq C ₃ H ₈)	1000	300	50	1600	400	250	1600	400	250	1600	400	250	1700
CO (g/GJ)	6 000	3 200	1 000	7 000	4 000	2 500	7 000	4 000	2 500	7 000	4 000	2 500	7 000
As (mg/GJ)	9,5	3,8	1,9	9,5	3,8	1,9	9,5	3,8	1,9	9,5	3,8	1,9	9,5
Cd (mg/GJ)	1,4	0,6	0,3	1,4	0,5	0,3	1,4	0,5	0,3	1,4	0,5	0,3	1,4
Cr (mg/GJ)	47	18,8	9,4	47	17,5	9,4	47	17,5	9,4	47	17,5	9,4	47
Cu (mg/GJ)	31	12,4	6,2	31	11,5	6,2	31	11,5	6,2	31	11,5	6,2	31
Hg (mg/GJ)	0,8	0,3	0,2	0,8	0,3	0,2	0,8	0,3	0,2	0,8	0,3	0,2	0,8
Ni (mg/GJ)	11	4,4	2,2	11	4,1	2,2	11	4,1	2,2	11	4,1	2,2	11
Pb (mg/GJ)	90	36	18	90	33,4	18	90	33,4	18	90	33,4	18	90
Se (mg/GJ)	7	2,8	1,4	7	2,6	1,4	7	2,6	1,4	7	2,6	1,4	7
Zn (mg/GJ)	290	116	58	290	107,7	58	290	107,7	58	290	107,7	58	290
PCDD-F (ng/l-TEQ/GJ)	100	40	20	100	37,1	20	100	37,1	20	100	37,1	20	100
8 HAP (mg/GJ)	55	22	11	602	223,6	120,4	602	223,6	120,4	224	83,2	44,8	284
BeP (mg/GJ)	4,7	1,9	0,9	51,3	19,1	10,3	51,3	19,1	10,3	19,1	7,1	3,8	24,2
BbF (mg/GJ)	5,3	2,1	1,1	57,5	21,3	11,5	57,5	21,3	11,5	21,4	7,9	4,3	27,1
BkF (mg/GJ)	3,2	1,3	0,6	35,2	13,1	7	35,2	13,1	7	13,1	4,9	2,6	16,6
IndPy (mg/GJ)	2,7	1,1	0,5	29,9	11,1	6	29,9	11,1	6	11,1	4,1	2,2	14,1
BghiPe (mg/GJ)	1,4	0,6	0,3	15,2	5,6	3	15,2	5,6	3	5,6	2,1	1,1	7,2
BeA (mg/GJ)	7,5	3	1,5	82,1	30,5	16,4	82,1	30,5	16,4	30,5	11,3	6,1	38,7
BahA (mg/GJ)	0,4	0,2	0,1	4,7	1,8	0,9	4,7	1,8	0,9	1,8	0,7	0,4	2,2
FluorA (mg/GJ)	29,8	11,9	6	326,1	121,1	65,2	326,1	121,1	65,2	121,3	45,1	24,3	153,9
TSP (g/GJ)	250	100	50	700	260	140	700	260	140	700	260	140	750
PM ₁₀ (g/GJ)	237,5	95	47,5	685	247	133	685	247	133	685	247	133	712,5
PM _{2,5} (g/GJ)	232,5	93	46,5	651	241,8	130,2	651	241,8	130,2	651	241,8	130,2	697,5
PM ₁₀ (g/GJ)	230	92	46	644	239,2	128,8	644	239,2	128,8	644	239,2	128,8	690

Tableau 10 : Résidentiel : Facteurs d'émissions des systèmes collectifs de chauffage au bois utilisés dans cette étude

Polluant atmosphérique	Unité	2005
CH4	g/GJ	3,2
CO2	kg/GJ	0
N2O	g/GJ	4
SO2	g/GJ	10
NOx	g/GJ	200
COVNM	g eq C3H8/GJ	4,8
CO	g/GJ	250
As	mg/GJ	9,5
Cd	mg/GJ	1,4
Cr	mg/GJ	47
Cu	mg/GJ	31
Hg	mg/GJ	0,8
Ni	mg/GJ	11
Pb	mg/GJ	90
Se	mg/GJ	7
Zn	mg/GJ	290
PCDD-F	ng i-TEQ/GJ	40
8 HAP	mg/GJ	8,1
BaP	mg/GJ	0,7
BbF	mg/GJ	0,8
BkF	mg/GJ	0,5
IndPy	mg/GJ	0,4
BghiPe	mg/GJ	0,2
BaA	mg/GJ	1,1
BahA	mg/GJ	0,1
FluorA	mg/GJ	4,3
TSP	g/GJ	100 (17*)
PM10	g/GJ	79,8
PM2,5	g/GJ	66,5
PM1,0	g/GJ	55

*pour les nouvelles chaufferies à partir de 2010

3.3 Résultats obtenus pour l'année 2005

Les données disponibles pour la réalisation de cet état de référence nous ont conduits à choisir l'année 2005 comme point de départ des simulations prospectives réalisées par la suite.

3.3.1 Consommations d'énergie en 2005

Les consommations de biomasse énergie (liqueurs noires comprises⁹) telles qu'elles ont été reconstituées pour les périmètres sectoriels étudiés¹⁰ s'élèvent à près de 7 715 ktep (voir tableau 11 et figure 3).

Les 6 087 ktep de bois consommées dans le secteur résidentiel représentent près de 79% des consommations de biomasse énergie, liqueurs noires incluses, et 87 % sans prise en compte de ces dernières. Ce secteur est d'ailleurs le seul où l'on peut considérer la part du bois comme significative par rapport à la consommation totale du secteur considéré. A noter en outre que les consommations de biomasse énergie du secteur tertiaire sont tout à fait négligeables par rapport aux consommations de l'ensemble de ce secteur.

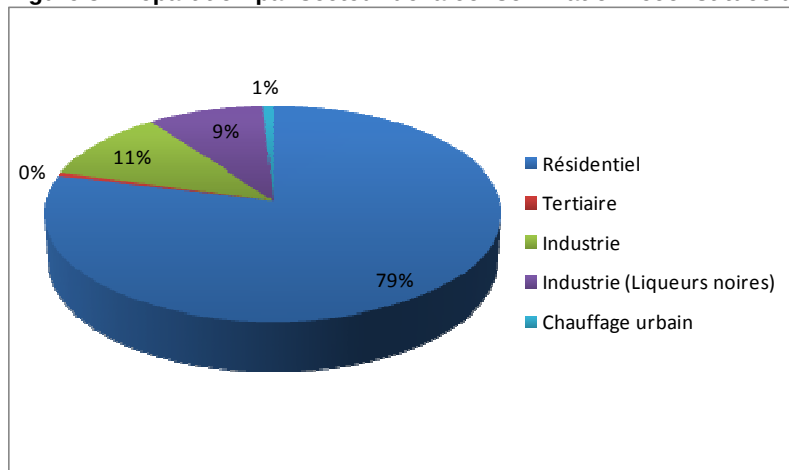
Tableau 11 : Consommation reconstituée de biomasse énergie par secteur en 2005

Secteur	Consommations de biomasse (ktep)	Part de la consommation totale	Part de la consommation totale (hors liqueurs noires)
Résidentiel	6 087	79%	87%
Tertiaire	39	1%	1%
Industrie	816	11%	12%
Industrie (Liqueurs noires)	714	9%	0%
Chauffage urbain	58	1%	1%
Total	7 715	100%	100%

⁹ Les liqueurs noires sont des combustibles issus de la fabrication de pâte à papier notamment. Elles sont parfois comptabilisées comme de la biomasse énergie dans les bilans énergétiques.

¹⁰ Les consommations énergétiques reconstituées sont celles liées au chauffage des parcs bâtis résidentiel et tertiaire, à la production de chaleur des chaufferies urbaines ainsi que les consommations de combustibles du secteur industriel.

Figure 3 : Répartition par secteur de la consommation reconstituée de biomasse énergie en 2005

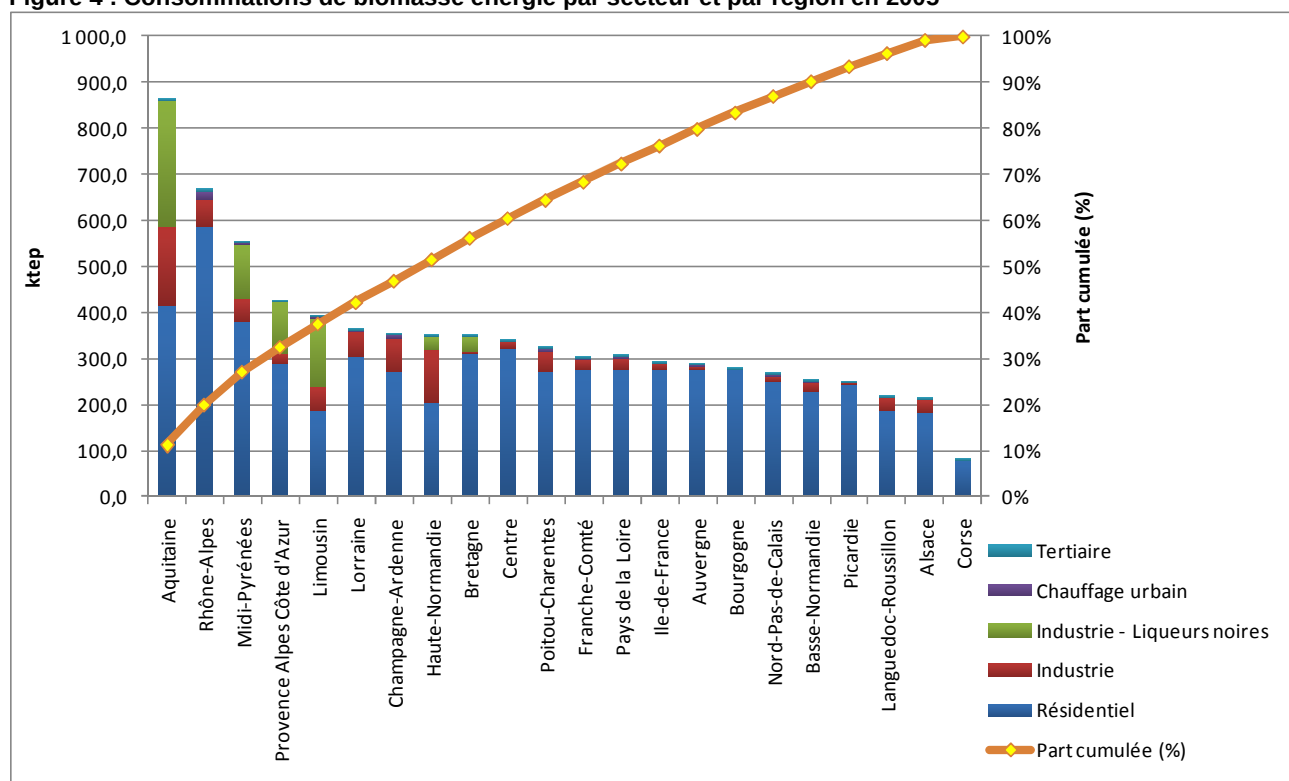


En termes de répartition géographique (voir tableau 12 et figure 4), on constate que les régions Aquitaine et Rhône-Alpes sont les plus consommatrices de biomasse énergie. Leurs consommations représentent respectivement l'équivalent de 862 ktep et 663 ktep. Plus de 30 % des consommations totales de biomasse énergie sont centralisés dans quatre régions (Aquitaine, Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées, Provence-Alpes-Côte d'Azur). Ce constat peut s'expliquer d'une part par l'importante disponibilité de ressources bois dans ces régions ainsi que par un développement de la filière bois plus avancé par rapport au reste du territoire.

Tableau 12 : Consommations de biomasse énergie par secteur et par région en 2005 (en ktep)

Région	Résidentiel	Industrie	Industrie - Liqueurs noires	Chauffage urbain	Tertiaire	Total
Aquitaine	414	174	271	2	3	863
Rhône-Alpes	587	59	0	25	5	671
Midi-Pyrénées	380	49	120	1	2	552
Provence-Alpes-Côte d'Azur	289	22	110	0	1	422
Limousin	186	52	150	5	3	396
Lorraine	304	55	0	1	1	362
Champagne-Ardenne	272	72	0	10	3	355
Haute-Normandie	203	116	30	1	2	351
Bretagne	310	4	33	0	3	351
Centre	322	14	0	2	0	338
Poitou-Charentes	271	45	0	8	3	325
Franche-Comté	277	19	0	7	4	306
Pays de la Loire	274	28	0	1	1	304
Ile-de-France	277	12	0	1	0	289
Auvergne	276	7	0	4	2	288
Bourgogne	275	0	0	3	2	279
Nord-Pas-de-Calais	251	12	0	1	0	264
Basse-Normandie	228	19	0	4	2	252
Picardie	245	2	0	0	0	246
Languedoc-Roussillon	187	27	0	2	3	218
Alsace	183	28	0	1	1	213
Corse	78			1	0	79
France entière	6 087	816	714	58	39	7 715

Figure 4 : Consommations de biomasse énergie par secteur et par région en 2005



3.3.2 Emissions de polluants atmosphériques en 2005

Les résultats affichés dans le présent chapitre sont issus du modèle développé spécifiquement dans le cadre de l'étude. Les écarts observés avec les données présentées au chapitre 1.1 s'expliquent notamment par la mise à jour des facteurs d'émissions effectuée et par l'utilisation de méthodologies de reconstitution des consommations différentes.

Le tableau 13 présente, pour l'état de référence 2005, les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques liées à la combustion du bois et des sous-produits du bois, à la combustion de liqueurs noires, le total qui en résulte, ainsi que les émissions totales toutes énergies (avec et sans production électrique) de l'ensemble du périmètre étudié.

Sur l'ensemble du périmètre étudié (production tout type d'énergie dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industrie et chauffage urbain), le bois est responsable de la quasi-totalité des émissions de HAP et de COVMN ainsi que de plus de deux-tiers des émissions de particules (TSP). Cette part de responsabilité de la biomasse énergie est d'autant plus importante que le diamètre de ces particules diminue. On passe en effet de 72% pour les PM10 à 83% pour les PM1,0. La part de la biomasse énergie dans les émissions de certains métaux est non négligeable, puisqu'elle dépasse 70% pour le plomb (Pb) et le zinc (Zn). Le bois est également responsable de près de 60% des dioxines et furanes (PCDD-F) émises. Ces résultats viennent confirmer le fait que le bois représente une source d'émissions non négligeable, pour quelques polluants ciblés, par rapport à l'ensemble des modes de production d'énergie. Ces résultats sont aussi à nuancer compte tenu de leur poids variable dans le total des émissions nationales (voir tableau 4)

L'analyse par secteur (voir tableau 14 et figure 5) met en évidence le rôle prépondérant du secteur résidentiel, et, dans une moindre mesure, de l'industrie, dans les émissions de polluants induites par le bois et les sous-produits du bois. Si la répartition observée est globalement le reflet de la distribution sectorielle des consommations, on observe quelques disparités liées essentiellement aux différences entre les facteurs d'émissions utilisés pour chacun des secteurs. Les consommations de bois du secteur résidentiel sont par exemple responsables de près de 67% des émissions de NOx induites par les consommations de bois et sous-produits du bois de l'ensemble des secteurs étudiés alors que cette part est de 97% pour les TSP.

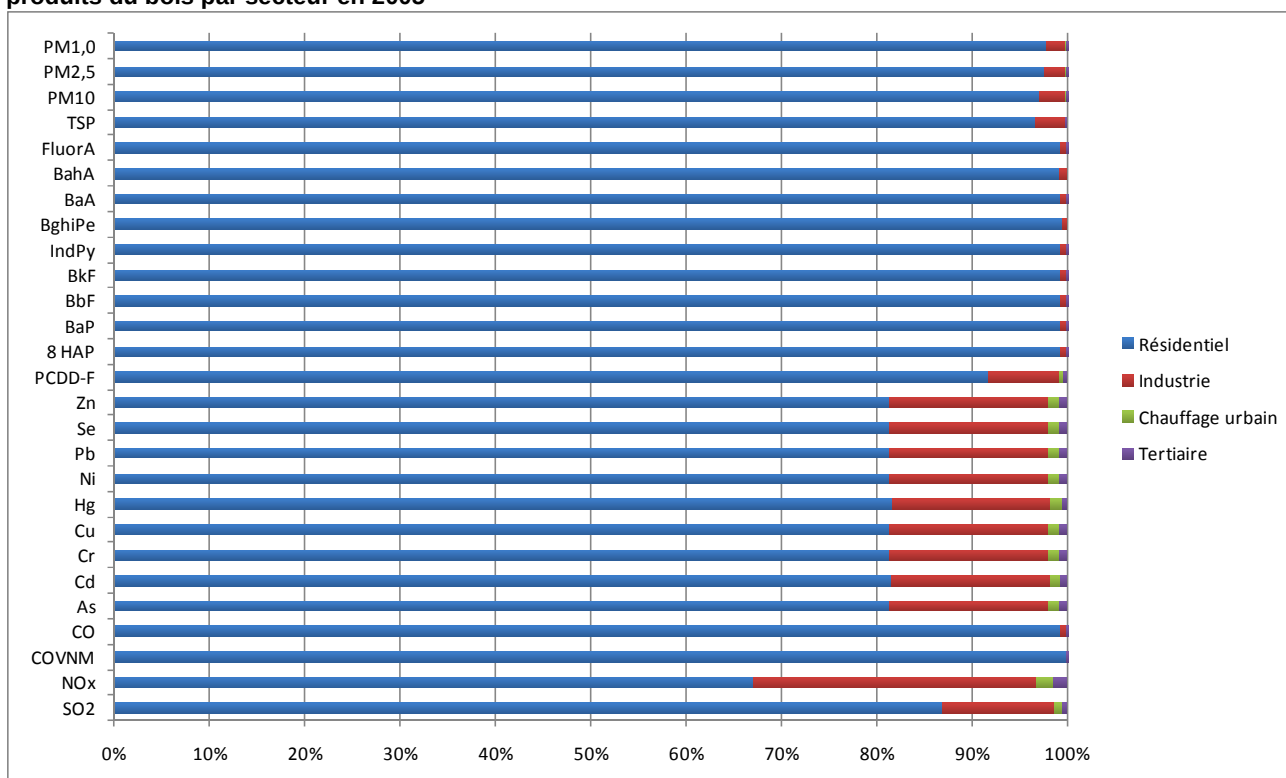
Tableau 13 : Emissions directes de GES et de polluants atmosphériques pour l'état de référence 2005, des secteurs combustion du bois et des sous-produits du bois, combustion de liqueurs noires, total biomasse énergie, toutes énergies¹¹ avec et sans production électrique

Polluant	Unité	Emissions liées à la combustion de bois et sous-produits du bois	Emissions liées à la combustion de liqueurs noires	Emissions totales de la biomasse énergie	Emissions totales toutes énergies (hors production électrique)	Part de la biomasse énergies dans les émissions totales toutes énergies (hors production électrique)	Emissions totales toutes énergies, production électrique comprise	Part de la biomasse énergie dans les émissions totales toutes énergies, production électrique incluse
Gaz à Effet de Serre (GES)								
CH4	t/an	74 840	149	74 989	89 609	84%	89 847	83%
CO2	kt/an	0	3 136	3 136	180 398	2%	214 609	1%
N2O	t/an	1 171	75	1 246	7 331	17%	8 907	14%
Total GES	kt eq CO2/an	1 935	3 162	5 097	184 552	3%	220 577	2%
Polluants atmosphériques								
SO2	t/an	2 928	7 807	10 735	309 421	3%	418 937	3%
NOx	t/an	22 952	2 437	25 389	221 863	11%	319 511	8%
COVNM	t eq C3H8/an	226 651	149	226 801	238 437	95%	239 824	95%
CO	t/an	1 329 088	448	1 329 536	1 458 867	91%	1 465 156	91%
As	kg/an	1 952	0	1 952	3 474	56%	4 418	44%
Cd	kg/an	288	0	288	662	43%	771	37%
Cr	kg/an	9 656	0	9 656	13 214	73%	15 175	64%
Cu	kg/an	6 369	0	6 369	9 178	69%	11 124	57%
Hg	kg/an	164	0	164	4 594	4%	7 663	2%
Ni	kg/an	2 260	0	2 260	85 028	3%	126 306	2%
Pb	kg/an	18 490	0	18 490	21 774	85%	22 985	80%
Se	kg/an	1 438	0	1 438	2 104	68%	2 487	58%
Zn	kg/an	59 580	0	59 580	71 566	83%	77 905	76%
PCDD-F	mg i-TEQ/an	18 210	0	18 210	47 858	38%	48 988	37%
8 HAP	kg/an	48 901	0	48 901	49 500	99%	49 514	99%
BaP	kg/an	4 170	0	4 170	4 189	100%	4 190	100%
BbF	kg/an	4 670	0	4 670	4 865	96%	4 866	96%
BkF	kg/an	2 857	0	2 857	3 040	94%	3 043	94%
IndPy	kg/an	2 429	0	2 429	2 439	100%	2 440	100%
BghiPe	kg/an	1 233	0	1 233	1 244	99%	1 244	99%
BaA	kg/an	6 669	0	6 669	6 688	100%	6 689	100%
BahA	kg/an	386	0	386	396	97%	396	97%
FluorA	kg/an	26 488	0	26 488	26 638	99%	26 644	99%
TSP	t/an	108 256	0	108 256	154 987	70%	162 635	67%
PM10	t/an	102 274	0	102 274	135 638	75%	141 985	72%
PM2,5	t/an	99 687	0	99 687	122 757	81%	126 159	79%
PM1,0	t/an	98 211	0	98 211	115 939	85%	117 640	83%

¹¹ Les émissions toutes énergies correspondent uniquement au total des émissions des secteurs étudiés. Les émissions de polluants atmosphériques liées au transport ou à l'agriculture ne sont ici pas prises en compte.

GES / Polluant	Emissions liées à l'ensemble des énergies				Emissions liées au bois et sous-produits du bois				Part des émissions dues au bois et sous-produits du bois dans l'ensemble des énergies							
	Tertiaire		Chauffage urb.		Industrie		Total général		Tertiaire		Chauffage urb.		Industrie		Total général	
	Résidentiel	Résidentiel	Tertiaire	Tertiaire	Chauffage urb.	Chauffage urb.	Industrie	Industrie	Résidentiel	Résidentiel	Tertiaire	Tertiaire	Chauffage urb.	Chauffage urb.	Industrie	Industrie
Gaz à Effet de Serre (GES)																
Polluants atmosphériques																
CH4	80 718	936	260	7 694	89 609	74 718	5	8	109	74 840	93%	1%	3%	1%	84%	84%
CO2	69 697	20 202	8 516	81 982	180 398	0	0	0	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%
N2O	3 291	664	315	3 061	7 331	1 018	7	10	137	1 171	31%	1%	3%	1%	16%	16%
Total GES	72 413	20 428	8 619	83 093	184 552	1 885	2	3	45	1 935	3%	0%	0%	0%	1%	1%
Polluants atmosphériques																
SO2	58 797	11 687	10 549	228 389	309 421	2 546	16	24	341	2 928	4%	0%	0%	0%	1%	1%
NOx	64 413	25 175	12 894	119 380	221 863	15 391	330	402	6 829	22 952	24%	1%	3%	6%	10%	10%
COVNM	229 482	938	388	7 628	238 437	226 468	8	12	154	226 651	99%	1%	3%	2%	95%	95%
CO	1 365 944	5 801	4 368	82 754	1 458 867	1 319 538	412	602	8 536	1 329 088	97%	7%	14%	10%	91%	91%
As	1 666	68	247	1 493	3 474	1 589	16	23	324	1 952	95%	23%	9%	22%	56%	56%
Cd	238	17	211	196	662	234	2	3	48	288	98%	14%	2%	24%	43%	43%
Cr	8 027	176	996	4 015	13 214	7 861	78	113	1 605	9 656	98%	44%	11%	40%	73%	73%
Cu	5 362	126	276	3 415	9 178	5 185	51	75	1 058	6 369	97%	41%	27%	31%	69%	69%
Hg	466	24	515	3 590	4 594	134	1	2	27	164	29%	5%	0%	1%	4%	4%
Ni	2 052	8 087	14 076	60 804	85 028	1 840	18	26	376	2 260	89%	0%	0%	1%	3%	3%
Pb	15 130	255	1 753	4 636	21 774	15 052	148	217	3 073	18 490	99%	58%	12%	66%	85%	85%
Se	1 188	58	105	753	2 104	1 171	12	17	239	1 438	99%	20%	16%	32%	68%	68%
Zn	49 055	767	4 095	17 649	71 566	48 501	478	698	9 902	59 580	99%	62%	17%	56%	83%	83%
PCDD-F	27 789	95	17 264	2 710	47 858	16 682	66	96	1 366	18 210	60%	70%	1%	50%	38%	38%
BAP	48 993	134	43	331	49 500	48 592	13	20	277	48 901	99%	10%	46%	84%	99%	99%
BaP	4 149	3	7	30	4 189	4 143	1	2	24	4 170	100%	40%	25%	78%	100%	100%
BbF	4 774	42	18	32	4 865	4 839	1	2	27	4 870	97%	3%	11%	86%	96%	96%
BbKf	2 977	43	2	19	3 040	2 838	1	1	17	2 857	95%	2%	77%	90%	94%	94%
IndPy	2 417	2	1	20	2 439	2 413	1	1	14	2 429	100%	40%	65%	69%	100%	100%
BghiPe	1 229	1	1	13	1 244	1 226	0	0	7	1 233	100%	23%	81%	54%	99%	99%
BaA	6 636	5	3	44	6 688	6 627	2	3	38	6 669	100%	38%	85%	85%	100%	100%
BaAa	385	1	0	9	396	382	0	0	3	386	99%	14%	67%	37%	97%	97%
FluorA	26 425	38	11	164	26 638	26 324	7	10	147	26 488	100%					

Figure 5 : Répartition des émissions directes de polluants atmosphériques liées à l'usage de bois et des sous-produits du bois par secteur en 2005¹²



¹² Les émissions induites par l'utilisation des liqueurs noires dans le secteur industriel ne sont pas prises en compte ici.

En termes de répartition territoriale, la majorité des émissions de polluants induites par le bois se situent essentiellement en ZAS 3, soit en zone rurale (voir tableau 15). Ce constat s'explique notamment par une diffusion plus importante des solutions biomasse énergie dans ce type de territoires. Une meilleure accessibilité à la ressource constitue l'un des arguments principaux pour expliquer cette distribution.

La répartition sectorielle des émissions liées au bois est assez similaire selon les types de territoire. En effet, comme en témoigne la figure 6, quelque soit la ZAS considérée, le secteur résidentiel est responsable de plus de 90% des émissions liées à la biomasse énergie. Il apparaît toutefois essentiel de nuancer ce propos dans la mesure où les émissions liées à l'industrie n'ont pu être déterminées à l'échelle de la ZAS pour cause de manques de données.

Figure 6 : Répartition des émissions directes de polluants atmosphériques liées à l'usage de bois et des sous-produits du bois par secteur et par ZAS en 2005

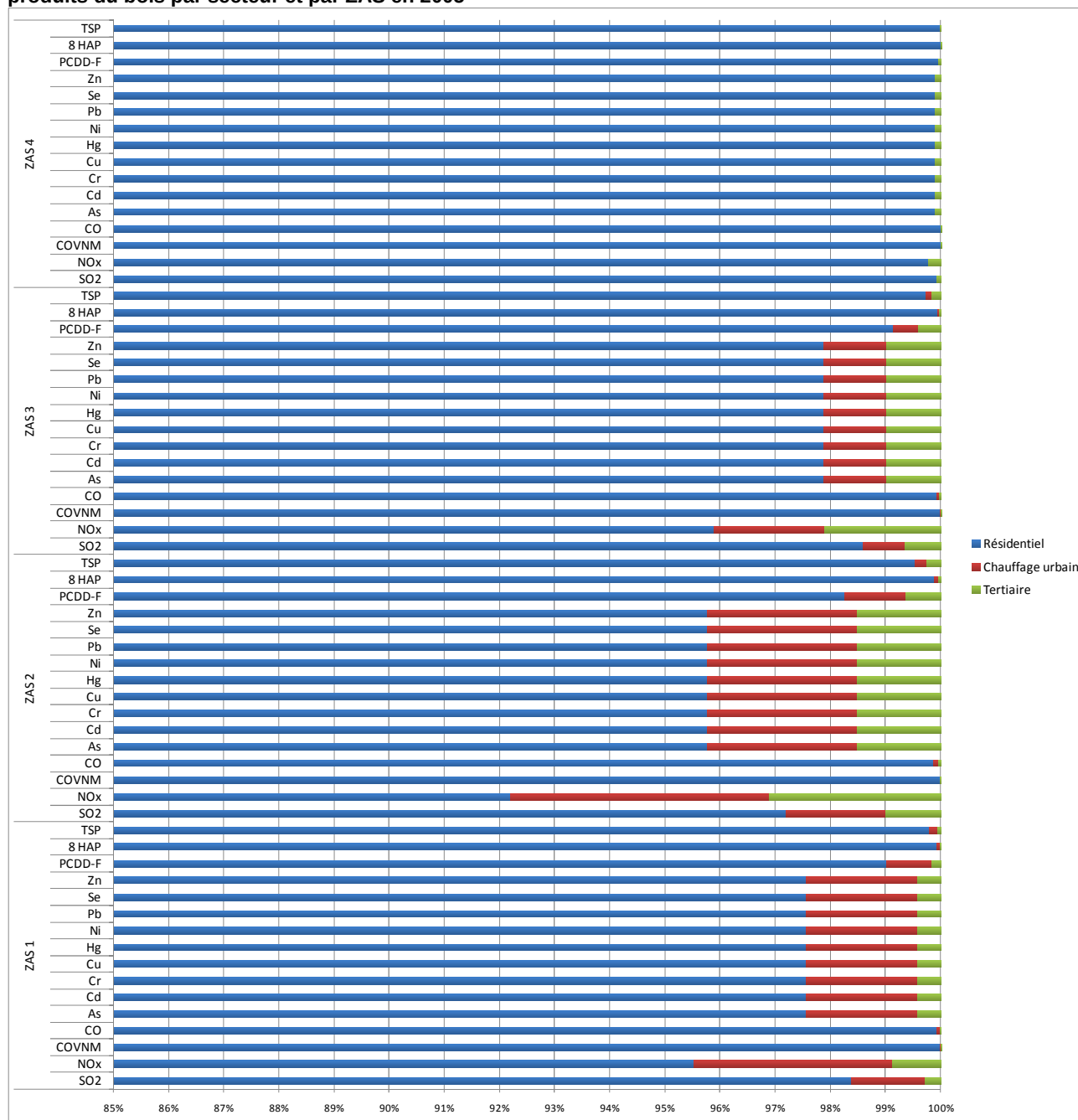


Tableau 15 : Emissions directes de GES et de polluants atmosphériques liées au chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire et à la production de chaleur des réseaux de chauffage urbain par ZAS en 2005

GES / Polluant	Emissions liées à l'ensemble des énergies				Emissions liées au bois et sous-produits du bois				Part des émissions dues au bois et sous-produits du bois dans l'ensemble des énergies						
	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général
	Gaz à Effet de Serre (GES)														
CH4	12 499	9 261	59 720	434	81 914	9 762	8 015	56 569	385	74 731	78%	87%	95%	89%	91%
CO2	39 459	16 963	41 328	666	98 415	0	0	0	0	0	0%	0%	0%	0%	0%
N2O	1 545	691	2 005	29	4 270	128	111	790	5	1 035	8%	16%	39%	17%	24%
Total GES	40 200	17 372	43 204	684	107 459	245	203	1 433	10	1 890	1%	1%	3%	1%	2%
Polluants atmosphériques															
SO2	27 837	11 642	41 195	358	81 032	321	279	1 975	12	2 587	1%	2%	5%	3%	3%
NOx	41 364	17 345	43 079	694	102 482	1 998	1 790	12 260	75	16 123	5%	10%	28%	11%	16%
COVNM	31 379	25 041	173 193	1 196	230 809	29 566	24 287	171 468	1 166	226 488	94%	97%	99%	97%	98%
CO	187 522	149 010	1 032 741	6 840	1 376 113	166 446	140 345	1 007 243	6 519	1 320 552	89%	94%	98%	95%	96%
As	435	227	1 311	9	1 981	202	175	1 242	8	1 627	47%	77%	95%	87%	82%
Cd	208	58	199	1	466	30	26	183	1	240	14%	45%	92%	83%	51%
Cr	1 827	1 028	6 304	40	9 199	1 001	866	6 146	38	8 051	55%	84%	97%	95%	88%
Cu	919	636	4 181	27	5 764	660	571	4 054	25	5 310	72%	90%	97%	93%	92%
Hg	575	122	305	2	1 005	17	15	105	1	137	3%	12%	34%	27%	14%
Ni	14 617	4 339	5 137	132	24 225	234	203	1 438	9	1 884	2%	5%	28%	7%	8%
Pb	3 251	1 901	11 910	75	17 138	1 917	1 659	11 769	73	15 417	59%	87%	99%	97%	90%
Se	244	155	945	6	1 351	149	129	915	6	1 199	61%	83%	97%	88%	89%
Zn	9 290	5 933	38 452	242	53 917	6 177	5 344	37 922	235	49 678	66%	90%	99%	97%	92%
PCDD-F	20 194	5 402	19 424	128	45 148	2 093	1 785	12 885	81	16 845	10%	33%	68%	63%	37%
8 HAP	6 496	5 341	37 074	258	49 169	6 346	5 257	36 766	255	48 625	98%	98%	99%	99%	99%
BaP	547	450	3 140	22	4 159	541	448	3 135	22	4 146	99%	100%	100%	100%	100%
BbF	663	531	3 614	25	4 833	606	502	3 510	24	4 643	91%	94%	97%	97%	96%
BkF	417	335	2 254	16	3 021	371	307	2 147	15	2 840	89%	92%	95%	94%	94%
IndPy	317	262	1 829	13	2 420	315	261	1 826	13	2 415	100%	100%	100%	100%	100%
BghiPe	161	133	930	6	1 231	160	133	927	6	1 226	99%	99%	100%	100%	100%
BaA	869	719	5 021	35	6 644	865	717	5 014	35	6 631	100%	100%	100%	100%	100%
BbA	51	42	292	2	387	50	41	289	2	382	98%	98%	99%	99%	99%
FluorA	3 471	2 869	19 985	139	26 474	3 438	2 848	19 918	138	26 341	99%	99%	100%	100%	99%
TSP	18 113	13 328	85 702	618	117 760	14 072	11 488	78 722	560	104 841	78%	86%	92%	91%	89%
PM10	17 132	12 644	81 572	586	111 934	13 363	10 904	74 752	532	99 550	78%	86%	92%	91%	89%
PM2.5	16 345	12 204	79 597	566	108 712	13 078	10 667	73 151	520	97 416	80%	87%	92%	92%	90%
PM1.0	15 854	11 908	78 116	556	106 434	12 933	10 545	72 340	515	96 333	82%	89%	92%	93%	91%

Tableau 16 : Emissions directes de GES et de polluants atmosphériques liées au chauffage du secteur résidentiel en 2005

GES / Polluant	Emissions liées à l'ensemble des énergies				Total général	Emissions liées au bois et sous-produits du bois				Total général	Part des émissions dues au bois et sous-produits du bois dans l'ensemble des énergies				Total général
	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4		ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4		ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	
	Gaz à Effet de Serre (GES)														
CH4	11 876	9 029	59 390	423	80 718	9 760	8 013	56 560	385	74 718	82%	89%	95%	91%	93%
CO2	23 739	11 620	33 898	440	69 697	0	0	0	0	0	0%	0%	0%	0%	0%
N2O	1 005	508	1 757	21	3 291	126	108	779	5	1 018	13%	21%	44%	23%	31%
Total GES	24 300	11 967	35 690	466	72 473	244	202	1 429	10	1 885	1%	2%	4%	2%	3%
Polluants atmosphériques															
SO2	14 423	7 893	36 253	227	58 797	316	271	1 947	12	2 546	2%	3%	5%	5%	4%
NOx	20 410	10 319	33 266	419	64 413	1 909	1 650	11 757	75	15 391	9%	16%	35%	18%	24%
COVNM	30 657	24 788	172 852	1 185	229 482	29 564	24 283	171 455	1 166	226 468	96%	98%	99%	98%	99%
CO	181 920	147 193	1 030 054	6 777	1 365 944	166 317	140 149	1 006 553	6 519	1 319 538	91%	95%	98%	96%	97%
As	225	177	1 257	8	1 666	197	168	1 216	8	1 589	88%	95%	97%	96%	95%
Cd	31	25	181	1	238	29	25	179	1	234	95%	98%	99%	98%	98%
Cr	1 035	849	6 104	39	8 027	977	829	6 016	38	7 861	94%	98%	99%	98%	99%
Cu	707	568	4 062	26	5 362	644	547	3 968	25	5 185	91%	96%	98%	97%	97%
Hg	133	53	277	2	466	17	14	102	1	134	12%	26%	37%	32%	29%
Ni	307	220	1 525	10	2 062	229	194	1 408	9	1 840	75%	88%	92%	90%	89%
Pb	1 898	1 597	11 562	73	15 130	1 870	1 588	11 521	73	15 052	99%	99%	100%	100%	99%
Se	152	126	905	6	1 188	145	124	896	6	1 171	96%	98%	99%	99%	99%
Zn	6 221	5 183	37 414	237	49 055	6 026	5 118	37 123	235	48 501	97%	99%	99%	99%	99%
PCDD-F	5 974	3 068	18 620	128	27 789	2 073	1 754	12 775	81	16 682	35%	57%	69%	63%	60%
8 HAP	6 423	5 308	37 005	257	48 993	6 341	5 251	36 744	255	48 592	99%	99%	99%	99%	99%
BaP	542	449	3 137	22	4 149	541	448	3 133	22	4 143	100%	100%	100%	100%	100%
BbF	633	521	3 596	25	4 774	605	501	3 508	24	4 639	96%	96%	98%	98%	97%
BkF	399	327	2 236	15	2 977	370	307	2 146	15	2 838	93%	94%	96%	97%	95%
IndPy	316	261	1 827	13	2 417	315	261	1 825	13	2 413	100%	100%	100%	100%	100%
BghiPe	161	133	929	6	1 229	160	132	927	6	1 226	100%	100%	100%	100%	100%
BaA	867	717	5 017	35	6 636	885	716	5 011	35	6 627	100%	100%	100%	100%	100%
BahA	51	42	291	2	385	50	41	289	2	382	99%	99%	99%	99%	99%
FluorA	3 456	2 859	19 972	139	26 425	3 435	2 845	19 906	138	26 324	99%	99%	100%	100%	100%
TSP	16 795	12 814	84 748	600	114 957	14 042	11 435	78 521	560	104 558	84%	89%	93%	93%	91%
PM10	16 092	12 240	80 815	572	109 719	13 338	10 861	74 589	532	99 320	83%	89%	92%	93%	91%
PM2.5	15 795	12 004	79 217	560	107 576	13 056	10 630	73 013	520	97 220	83%	89%	92%	93%	90%
PM10.0	15 453	11 753	77 812	551	105 569	12 915	10 514	72 224	515	96 167	84%	89%	93%	93%	91%

Tableau 17 : Emissions directes de GES et de polluants atmosphériques liées au chauffage du secteur tertiaire en 2005

GES / Polluant	Emissions liées à l'ensemble des énergies				Emissions liées au bois et sous-produits du bois				Part des émissions dues au bois et sous-produits du bois dans l'ensemble des énergies							
	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général	
	Gaz à Effet de Serre (GES)															
	Polluants atmosphériques															
CH4	436	184	309	7	936	0	0	1	4	0	5	0%	0%	1%	0%	1%
CO2	9 101	3 973	6 966	162	20 202	0	0	0	0	0	0	0%	0%	0%	0%	0%
N2O	304	131	224	5	664	0	0	1	5	0	7	0%	0%	1%	2%	0%
Total GES	9 205	4 018	7 042	164	20 428	0	0	0	2	0	2	0%	0%	0%	0%	0%
SO2	4 853	2 288	4 444	102	11 687	1	1	3	13	0	16	0%	0%	0%	0%	0%
NOx	11 124	4 943	8 906	202	25 175	18	56	257	0	0	330	0%	0%	1%	3%	1%
COVNM	436	185	311	7	938	0	0	1	6	0	8	0%	0%	1%	2%	0%
CO	2 492	1 130	2 136	42	5 801	22	70	321	0	0	412	1%	6%	15%	0%	7%
As	24	13	30	0	68	1	3	12	0	0	16	3%	20%	41%	2%	23%
Cd	7	3	7	0	17	0	0	2	0	0	2	2%	12%	27%	1%	14%
Cr	49	33	93	1	176	4	13	60	0	0	78	8%	40%	65%	4%	44%
Cu	37	24	65	1	126	3	9	40	0	0	51	7%	37%	61%	4%	41%
Hg	11	5	9	0	24	0	0	1	1	0	1	1%	5%	12%	0%	5%
Ni	3 668	1 615	2 735	69	8 087	1	3	14	0	0	18	0%	0%	1%	0%	0%
Pb	58	46	151	1	255	8	25	115	0	0	148	14%	54%	76%	8%	58%
Se	22	11	25	0	58	1	2	9	0	0	12	3%	17%	37%	1%	20%
Zn	156	138	469	3	767	25	81	372	0	0	478	16%	58%	79%	9%	62%
PCDD-F	17	17	61	0	95	4	11	51	0	0	66	21%	66%	84%	12%	70%
8 HAP	51	26	56	1	134	1	2	10	0	0	13	1%	9%	18%	1%	10%
BaP	1	1	2	0	3	0	0	1	1	0	1	8%	37%	58%	4%	40%
BbF	17	8	16	0	42	0	0	1	1	0	1	0%	3%	6%	0%	3%
BkF	17	8	17	0	43	0	0	1	1	0	1	0%	2%	4%	0%	2%
IndPy	0	0	1	0	2	0	0	1	1	0	1	8%	37%	58%	4%	40%
BghiPe	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	4%	21%	38%	2%	23%
BaA	1	1	3	0	5	0	0	1	1	0	2	7%	35%	56%	3%	38%
BahA	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2%	13%	26%	1%	14%
FluorA	13	7	17	0	38	0	1	6	0	0	7	3%	17%	32%	1%	19%
TSP	821	408	859	17	2 106	9	28	128	0	0	165	1%	7%	15%	0%	8%
PM10	649	323	679	13	1 685	7	22	102	0	0	132	7%	7%	15%	0%	8%
PM2.5	262	138	315	5	721	6	19	85	0	0	110	2%	13%	27%	1%	15%
PM10.0	204	109	249	4	566	5	15	71	0	0	91	2%	14%	28%	1%	16%

Tableau 18 : Emissions directes de GES et de polluants atmosphériques liées à la production de chaleur des réseaux de chauffage urbain par ZAS en 2005

GES / Polluant	Emissions liées à l'ensemble des énergies				Total général	Emissions liées au bois et sous-produits du bois				Part des émissions dues au bois et sous-produits du bois dans l'ensemble des énergies				
	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4		ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général
	Gaz à Effet de Serre (GES)					Total général	Polluants atmosphériques							
	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4			ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4
CH4	188	47	22	4	260	1	2	5	0	8	3%	22%	0%	3%
CO2	6 618	1 370	464	63	8 516	0	0	0	0	0	0%	0%	0%	0%
N2O	236	53	23	3	315	2	2	6	0	10	1%	4%	25%	3%
Total GES	6 696	1 387	472	64	8 619	1	1	2	0	3	0%	0%	0%	0%
Polluants atmosphériques														
SO2	8 561	1 462	498	28	10 549	4	5	15	0	24	0%	3%	0%	0%
NOx	9 800	2 083	907	74	12 864	72	84	246	0	402	1%	4%	27%	3%
COVNM	287	68	30	4	388	2	2	7	0	12	1%	4%	23%	3%
CO	3 110	687	551	20	4 368	108	126	369	0	602	3%	18%	67%	14%
As	188	37	24	0	247	4	5	14	0	23	2%	13%	58%	9%
Cd	170	29	11	0	211	1	1	2	0	3	0%	2%	19%	2%
Cr	743	146	107	1	996	20	24	69	0	113	3%	16%	65%	11%
Cu	175	45	55	0	276	13	16	46	0	75	8%	35%	83%	27%
Hg	431	64	19	0	515	0	0	1	0	2	0%	1%	6%	0%
Ni	10 643	2 504	877	53	14 076	5	6	16	0	26	0%	0%	2%	0%
Pb	1 297	257	197	1	1 753	39	45	133	0	217	3%	18%	67%	12%
Se	71	19	15	0	105	3	4	10	0	17	4%	19%	67%	16%
Zn	2 913	612	569	2	4 095	125	146	428	0	693	4%	24%	75%	17%
PCDD-F	14 203	2 317	743	0	17 264	17	20	59	0	96	0%	1%	8%	1%
8 HAP	23	7	13	0	43	3	4	12	0	20	15%	57%	93%	46%
BaP	5	1	1	0	7	0	0	1	0	2	7%	34%	83%	25%
BbF	14	3	2	0	18	0	0	1	0	2	3%	16%	64%	11%
BkF	0	0	1	0	2	0	0	1	0	1	43%	84%	97%	77%
IndPy	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	29%	75%	96%	65%
BghiPe	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	49%	87%	98%	81%
BaA	1	1	2	0	3	0	1	2	0	3	78%	96%	99%	94%
BahA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31%	76%	95%	67%
FluorA	2	2	6	0	11	2	2	6	0	10	79%	97%	100%	94%
TSP	496	105	95	1	697	21	25	72	0	118	4%	23%	76%	17%
PM10	391	81	78	1	550	18	21	60	0	93	4%	25%	78%	18%
PM2.5	288	61	65	0	415	15	18	53	0	86	5%	29%	81%	21%
PM10.0	197	47	55	0	299	13	16	46	0	74	7%	33%	83%	25%

3.3.3 Zoom sur le secteur résidentiel pour l'année 2005

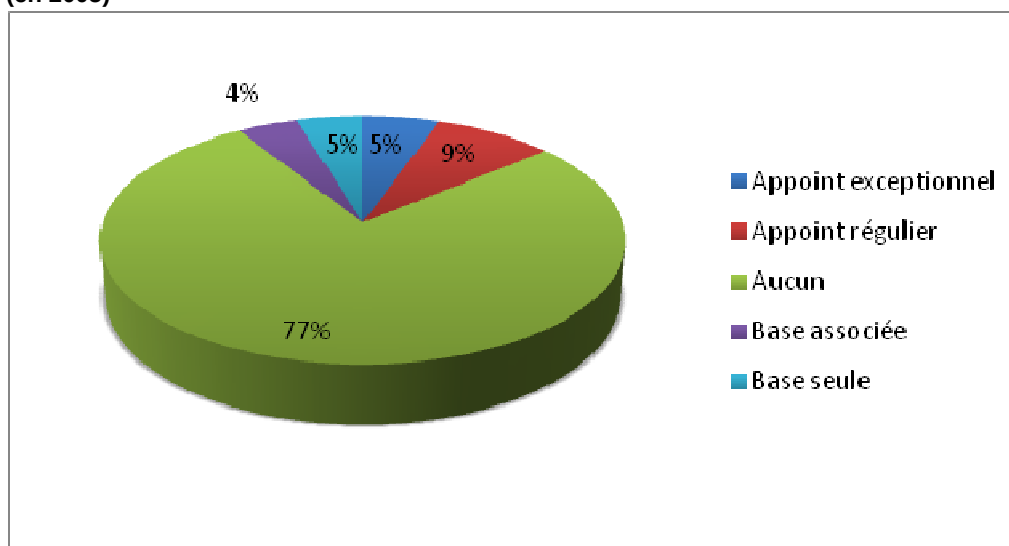
Le secteur résidentiel est le plus consommateur de biomasse énergie et aussi le plus émetteur de polluants. Une analyse plus poussée apparaissait donc intéressante dans le cadre de cette synthèse.

L'analyse de la répartition des usages du bois fait ressortir une caractéristique importante concernant cette énergie de chauffage : la majorité des foyers chauffés au bois utilisent cette énergie comme appoint (voir tableau 19 et figure 7). Ce constat traduit toute l'importance du traitement de la thématique des solutions de chauffage bi-énergies dans le cadre de la réalisation d'un bilan énergétique concernant la biomasse énergie et au-delà pour les simulations prospectives.

Tableau 19 : Nombre de résidences principales françaises selon leur usage de la biomasse énergie (en 2005) et consommations de biomasse liées au chauffage associées

Usages du bois	Nombre de logements (en millions)	Part représentée en nombre de logements (%)	Consommations de biomasse (en ktep)	Consommations de biomasse (en milliers de stères)	Part représentée en consommations de biomasse (%)
Aucun	19,04	77,2%			0,00%
Base seule	1,15	4,7%	2 493	16 953	41,0%
Base associée	1,05	4,3%	1 509	10 260	24,8%
Appoint régulier	2,09	8,5%	1 616	10 989	26,5%
Appoint exceptionnel	1,33	5,4%	469	3 191	7,7%
Total	24,67	100,00%	6 087	41 393	100,0%

Figure 7 : Répartition du nombre de résidences principales françaises selon leur usage de la biomasse énergie (en 2005)



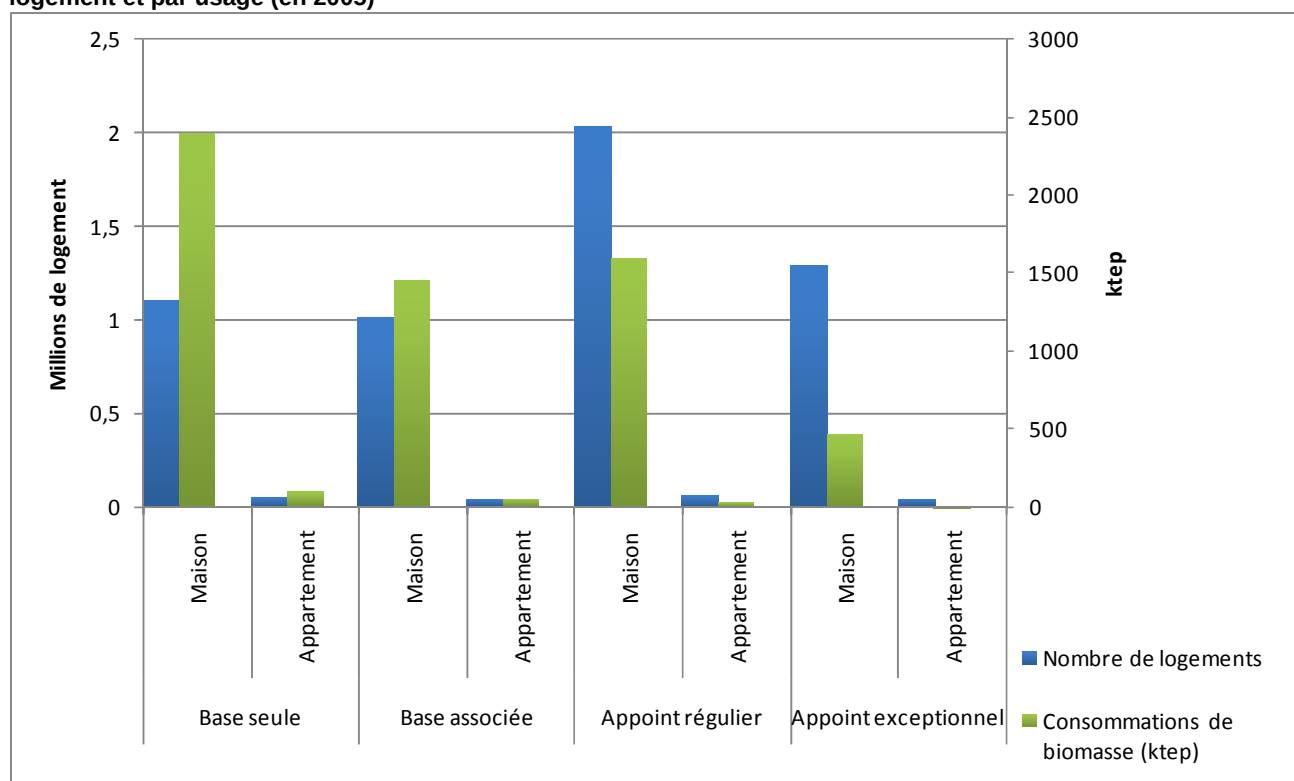
Comme le montrent le tableau 20 et la figure 8, environ 5,44 millions de maisons individuelles utilisent le bois comme énergie de chauffage ce qui représente 97% des résidences principales chauffées au bois et près de 38 % de l'ensemble des maisons individuelles. Ce type de bâtiment consomme plus de 5 900 ktep de bois, soit environ 97% des consommations de biomasse énergie du secteur résidentiel.

Seuls 190 000 appartements, soit 0,4 % du parc de résidences principales français, utilisent le bois comme énergie de chauffage. Plus de 92% de ces derniers utilisent un système de chauffage domestique. Les près de 8% restants (environ 15 000 appartements) sont quant à eux chauffés à l'aide de chaudières au bois collectives dont la consommation totale liée au chauffage avoisine les 17 ktep de biomasse énergie.

Tableau 20 : Consommations de biomasse énergie liées au chauffage des résidences principales par type de logement et par usage (en 2005)

Type de logement	Usage du bois	Nombre de logements (millions)	Consommations de biomasse (ktep)	Consommations de biomasse (milliers de stères)
Maison	Base seule	1,11	2 393	16 279
Maison	Base associée	1,01	1 455	9 898
Maison	Appoint régulier	2,03	1 594	10 844
Maison	Appoint exceptionnel	1,29	465	3 163
Total Maison		5,44	5 907	40 184
Appartement	Base seule	0,05	100	680
Appartement	Base associée	0,04	53	361
Appartement	Appoint régulier	0,06	22	150
Appartement	Appoint exceptionnel	0,04	5	34
Total Appartement		0,19	180	1 224

Figure 8 : Consommations de biomasse énergie liées au chauffage des résidences principales par type de logement et par usage (en 2005)



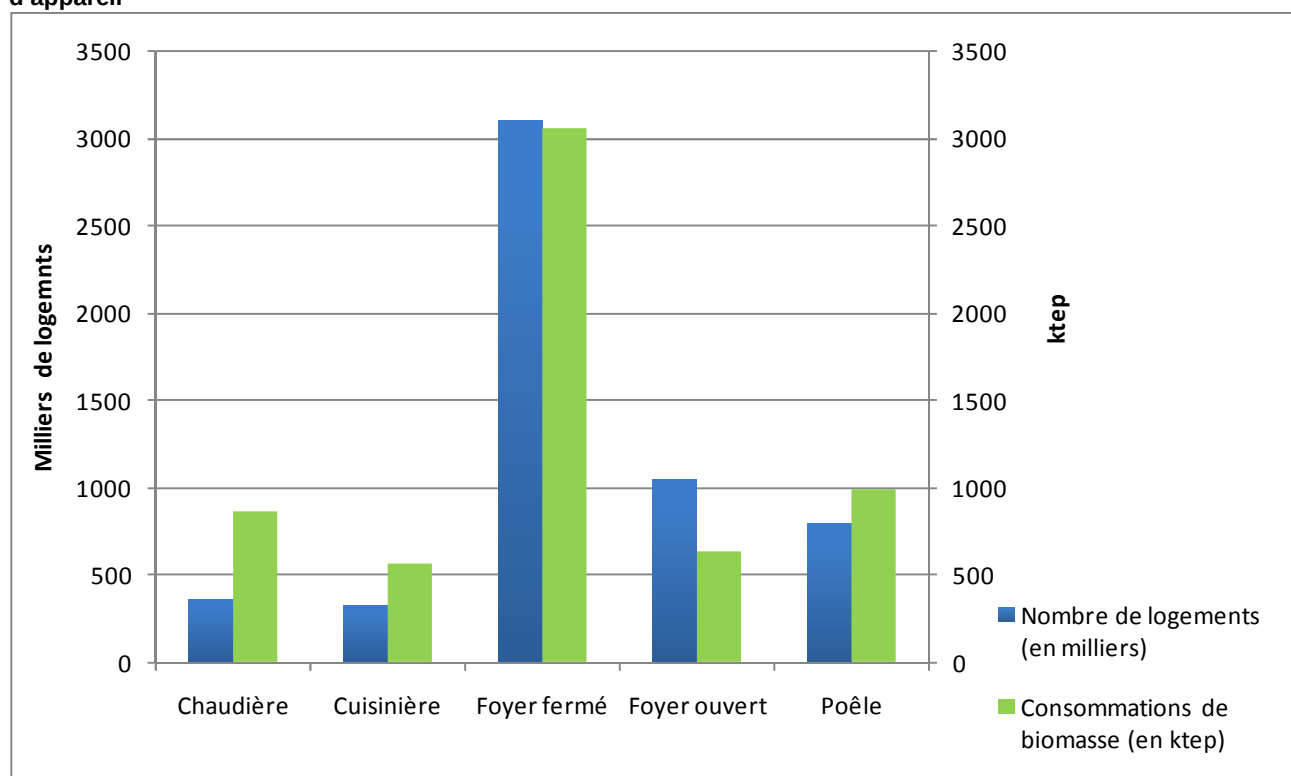
Si l'on s'intéresse aux systèmes de chauffage, près de 55% (3,1 millions sur 5,6 millions) des appareils de chauffage au bois utilisés pour le chauffage des résidences principales sont des foyers fermés (voir tableau 21 et figure 9). Ces appareils consomment au total environ 3 050 ktep, soit 35,5 TWh ce qui correspond à une consommation unitaire moyenne d'environ 6,7 stères par logement, soit environ 11 450 kWh par logement.¹³

Les différences de consommations unitaires présentées au tableau 21 s'expliquent à la fois par des répartitions différentes en termes d'usage, de performance thermique des logements dans lesquels se trouvent chacun des types de systèmes de chauffage au bois et de répartition territoriale de ces derniers (climat). Ces différences constituent également l'une des clés de compréhension des émissions liées au secteur résidentiel présentées par la suite.

Tableau 21 : Nombre de résidences principales françaises selon le type de systèmes de chauffage au bois utilisé consommations de biomasse liées au chauffage associées

Type d'appareil	Nombre de logements (en milliers)	Part représentée en nombre de logements (%)	Consommations de biomasse (en ktep)	Consommations de biomasse (en milliers de stères)	Part représentée en consommations de biomasse (%)	Consommations unitaires de biomasse (en stères)
Chaudière	355	6%	860	5 850	14%	16,5
Cuisinière	330	6%	563	3 830	9%	11,6
Foyer fermé	3 105	55%	3 050	20 748	50%	6,7
Foyer ouvert	1 048	19%	627	4 265	10%	4,1
Poêle	792	14%	987	6 714	16%	8,5
Total	5 630	100%	6 087	41 408	100%	7,4

Figure 9 : Consommations de biomasse énergie liées au chauffage des résidences principales par type d'appareil



¹³ Le coefficient de conversion utilisé pour un stère de bois est de 1710 kWh ou 0,147 tep (Source : CEREN)

Polluant / GES	Chaudière		Cuisinière		Foyer fermé		Foyer ouvert		Poêle		Total général									
	Base seuile	Base associée	Base seuile	Base associée	Base seuile	Base associée	Base seuile	Base associée	Base seuile	Base associée										
	6 494	3 042	5 052	3 030	1 417	173	11 348	6 759	11 370	2 740	2 394	2 185	6 300	3 948	6 300	1 635	2 840	1 635	281	74 718
CH4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	99	45	49	30	14	2	180	107	180	43	17	15	32	45	28	72	55	32	5	1 018
N2O	167	78	121	73	34	4	294	175	295	71	56	51	146	92	100	77	44	8	8	1 885
GES																				
Polluants atmosphériques																				
SO2	247	112	123	74	34	4	449	268	450	109	42	39	112	70	181	139	80	14	14	2 546
NOx	1 592	680	738	443	207	25	2 696	1 606	2 702	651	254	232	569	419	1 086	831	478	82	82	15 391
COVNM	19 658	9 210	15 279	9 164	4 265	523	34 494	20 544	34 559	8 329	7 203	6 573	18 955	11 880	11 313	8 660	4 963	857	857	226 468
CO	1 26 377	59 140	74 954	44 958	21 019	2 565	219 219	130 562	219 634	52 932	29 661	27 065	78 051	48 936	80 854	61 893	35 617	6 122	6 122	1 319 538
As	199	90	95	57	27	3	239	143	240	58	40	37	106	66	83	63	36	6	6	1 589
Pb	29	13	14	8	4	1	35	21	35	9	6	5	16	10	12	9	5	1	1	234
Cd	966	447	469	281	132	16	1 184	705	1 186	286	199	182	524	328	410	314	180	31	31	7 861
Cr	851	295	309	186	87	11	781	465	782	189	131	120	346	217	270	207	119	20	20	5 185
Cu	17	8	8	5	2	0	20	12	20	5	3	3	9	6	7	5	3	1	1	134
Hg	231	105	110	66	31	4	277	165	278	67	47	43	123	77	96	73	42	7	7	1 849
Ni	1 889	855	898	539	252	31	2 287	1 350	2 272	547	381	348	1 004	629	764	600	345	59	59	15 052
Pb	147	67	70	42	20	2	176	105	177	43	30	27	78	49	61	47	27	5	5	1 171
Se	6 086	2 756	2 895	1 736	812	99	7 306	4 351	7 320	1 764	1 229	1 121	3 234	2 027	2 527	1 934	1 113	191	191	48 501
Zn	2 056	950	988	599	280	34	2 519	1 500	2 524	608	424	387	1 115	699	871	667	364	66	66	16 682
PCDD-F	1 121	523	6 010	3 605	1 685	206	5 643	3 361	5 654	1 363	1 203	1 098	3 167	1 985	5 246	4 016	2 311	397	397	48 592
HAP	96	45	512	307	144	18	481	267	482	116	103	94	270	189	447	342	197	34	34	4 143
BaP	107	50	574	344	161	20	539	321	540	130	115	105	302	189	501	383	221	38	38	4 639
BaF	65	31																		

4 Prospective 2020-2050

4.1 Définition du modèle prospectif

Le modèle prospectif permet de déterminer au pas de temps annuel, de 2005 à 2050, les consommations énergétiques et émissions de polluants atmosphériques selon le niveau de détails décrit dans l'état de référence et selon des leviers de simulation à disposition, tels que présentés dans le tableau 23.

Tableau 23 : Niveaux de détails des sorties du modèle prospectif

Echelle territoriale de description	Secteur	Discriminants disponibles
Zone climatique - ZAS	Résidentiel	Type de logement (Maison, Appartement)
		Période de construction des logements (Avant 1949, 1949-1975, 1976-1989, 1990-2005, 2006-2012, 2012-2020, 2020-2050)
		Type de système de chauffage (Individuel, Collectif)
		Energie de chauffage principale du logement (Chauffage urbain, Gaz naturel, Fioul, Electricité - Effet Joule, GPL, Charbon, Bois, Electricité - PAC)
		Energie de chauffage secondaire du logement (Chauffage urbain, Gaz naturel, Fioul, Electricité - Effet Joule, GPL, Charbon, Bois, Electricité - PAC)
		Usage du bois dans le logement (Base seule, Base associée, Appoint régulier, Appoint exceptionnel)
		Type de système de chauffage au bois utilisé (Individuel : Chaudière, Cuisinière, Poêle, Foyer fermé, Foyer ouvert, Cogénération – Collectif : Chaudière, Cogénération)
		Type de combustible bois utilisé (Bûches, Granulés, Plaquettes, Biomasse agricole)
	Tertiaire	Branche (Administration, Bureaux, Cafés-Hôtels-Restaurants, Commerce, Enseignement, Habitat communautaire, Santé, Sports Loisirs Culture, Transports)
		Energie de chauffage (Chauffage urbain, Gaz, Fioul, Electricité - Effet Joule, Electricité - PAC, Bois, Autres)
		Type de système de chauffage au bois utilisé (Chaudière, Cogénération)
		Type de combustible utilisé (Bûches, Granulés, Plaquettes, Biomasse agricole)
Nationale	Industrie	Chauffage urbain
		Energie (UIOM, Gaz, Fioul, Géothermie, Charbon, Bois, Autres)
		Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie (NCE)
		Energie (Autres produits pétroliers, Fioul, Gaz, GPL, Houille - Lignite - Charbon pauvre - Coke de houille, Bois et sous-produits du bois, Liqueurs noires, Autres)

Le modèle de simulation prospective a été réalisé selon une approche systémique c'est-à-dire dans une volonté de description globale de l'évolution des consommations énergétiques et des émissions de GES et de polluants atmosphériques du périmètre étudié. La méthodologie complète est décrite dans le rapport.

Les leviers mis en exergue dans le cadre de l'élaboration du modèle sont présentés au tableau 24. Les paramètres utilisés pour la modélisation des impacts de ces derniers ainsi que l'échelle territoriale et les discriminants de paramétrage des hypothèses y sont également présentés. En outre, dans un souci de cohérence systémique, l'établissement de liens entre les secteurs a été recherché. Et ce travail a abouti à la création d'une relation entre demande de chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire et production des réseaux de chaleur urbains.

En ce qui concerne l'évolution temporelle, il convient de noter que le paramétrage des hypothèses est possible pour trois plages de simulation : 2006-2012, 2013-2020, 2021-2050.

Tableau 24 : Leviers, paramètres et niveaux de paramétrage du modèle prospectif

Secteur	Leviers	Paramètres	Echelle territoriale de paramétrage	Discriminants de paramétrage
Résidentiel	Réhabilitation thermique des bâtiments	Part des logements réhabilités	Zone climatique	Période de construction, Type de logement (Maison, Appartement)
		Qualité de la réhabilitation (Diminution du besoin associée)	Nationale	Période de construction, Type de logement (Maison, Appartement)
	Changements de système de chauffage	Durée de vie des systèmes	Nationale	Type de système de chauffage, Energie de chauffage, Type d'appareil de chauffage au bois utilisé (le cas échéant)
		Transferts entre solutions de chauffage	ZAS	Type de logement, Type de système de chauffage (Collectif, individuel), Energie de chauffage principale, Energie de chauffage secondaire, Usage du bois, Type de système de chauffage au bois, Type de combustible bois utilisé
	Caractéristiques des systèmes de chauffage neufs	Rendements	Nationale	Type de système de chauffage, Energie de chauffage, Type d'appareil de chauffage au bois utilisé (le cas échéant), Type de combustible bois utilisé (le cas échéant)
		Facteurs d'émissions	Nationale	Type de système de chauffage, Energie de chauffage, Type d'appareil de chauffage au bois utilisé (le cas échéant), Type de combustible bois utilisé (le cas échéant)
	Construction neuve	Nombre de logements neufs	Zone climatique - ZAS	-
		Répartition par type de logement (Maison, Appartement)	Zone climatique - ZAS	-
		Surface moyenne des logements neufs	Nationale	Type de logement
		Qualité thermique de la construction neuve	Zone climatique	-
		Parts de marché des différentes solutions de chauffage	ZAS	Type de logement, Type de système de chauffage (Collectif, individuel), Energie de chauffage principale, Energie de chauffage secondaire, Usage du bois, Type de système de chauffage au bois, Type de combustible utilisé
Tertiaire	Réhabilitation thermique des bâtiments	Part de surfaces réhabilitées	Zone climatique	Période de construction, Branche
		Qualité de la réhabilitation	Nationale	Période de construction, Branche
	Changements de système de chauffage	Durée de vie des systèmes	Nationale	Energie de chauffage, Type de système de chauffage au bois utilisé, Type de combustible bois utilisé
		Transferts entre solutions de chauffage	ZAS	Energie de chauffage, Type de système de chauffage au bois utilisé, Type de combustible bois utilisé
	Caractéristiques des systèmes de chauffage neufs	Rendements	Nationale	Energie de chauffage, Type de système de chauffage au bois utilisé, Type de combustible bois utilisé
		Facteurs d'émissions	Nationale	Energie de chauffage, Type de système de chauffage au bois utilisé, Type de combustible bois utilisé
	Construction neuve	Taux de construction neuve	Nationale	Branche
		Qualité thermique de la construction neuve	Nationale	Période de construction, Type de logement (Maison, Appartement)
		Parts de marché des différentes solutions de chauffage	ZAS	Energie de chauffage, Type de système de chauffage au bois utilisé, Type de combustible bois utilisé
	Sorties de parc	Taux de sortie	Nationale	Branche
Chauffage urbain	Développement des réseaux	Nombre de logements et surfaces tertiaires raccordés		*
	Mix énergétique	Mix énergétique	ZAS	-
Industrie	Amélioration de la performance énergétique	Taux de diminution des consommations énergétiques	Nationale	NCE
	Mix énergétique	Pénétration de la biomasse énergie (Bois et sous-produits du bois) dans le mix énergétique	Nationale	NCE

* La production d'énergie des réseaux de chaleur urbains est directement définie par les demandes d'énergie des secteurs résidentiel et tertiaire. Le levier d'action correspondant se situe donc essentiellement au niveau des parts de marché du chauffage urbain dans les constructions neuves résidentielles et tertiaires ainsi qu'au niveau des renouvellements de systèmes de chauffage. A noter toutefois que la production de chaleur de ces réseaux destinée aux autres usages que le chauffage (production d'ECS notamment) a été considérée comme invariante au cours du temps. Ceci constitue une hypothèse assez lourde dans la mesure où tout nouveau raccordement est susceptible d'induire une augmentation de la production nécessaire au chauffage du bâtiment raccordé, ici prise en compte, mais également une production d'énergie supplémentaire liée à d'autres usages.

4.2 Hypothèses principales de chacun des scénarios

4.2.1 Eléments de cadrage

Les scénarios prospectifs élaborés dans le cadre de cette étude ont été établis à partir de l'analyse de l'état de référence 2005 couplée à la prise en compte des objectifs nationaux fixés par le Grenelle de l'Environnement et l'ensemble des documents prospectifs officiels (Programmation pluriannuelle des investissements de Chaleur,..).

Ces objectifs constituent les éléments de cadrage des scénarios élaborés, à savoir :

- Rythme de 400 000 logements réhabilités par an à compter de 2013 (Article 5 de la loi Grenelle 1)
- Atteinte des objectifs relatifs au développement de la biomasse énergie fixés par la PPI Chaleur (voir tableau 25)
- Développement important des réseaux de chaleur
- Atteinte du Facteur 4 en 2050
- Réduction des consommations d'énergie de 38 % d'ici à 2020¹⁴ (en énergie primaire hors EnR)

A noter que ces deux derniers objectifs sont, plutôt que des éléments structurants pris en compte à l'heure de l'élaboration des simulations, des cibles auxquelles les résultats des scénarios ont été comparés.

Tableau 25 : Ventilation par filière des objectifs de consommation de biomasse du COMOP 10 aux horizons 2012 et 2020 (source : PPI chaleur 2009-2020)

Secteur	Unité	Situation 2006	Objectif au 31/12/2012	Objectif 2020
Résidentiel individuel*	ktep	7400	7400	7400
	millions de logements	5,75	7,3	9
Bâtiments	ktep	100	300	800
Réseaux de chaleur collectif/tertiaire	ktep	100	300	1200
Industrie/Process	ktep	1200	1900	3200

* Le libellé « Résidentiel individuel » désigne ici le parc de logements chauffés à l'aide d'un système de chauffage individuel au bois.

4.2.2 Hypothèses

Deux scénarios prospectifs contrastés ont été élaborés, afin de mesurer l'impact de différentes conditions techniques et économiques du développement de la biomasse. L'unique point de divergence entre ces scénarios concerne les chiffres de consommation de biomasse des systèmes de chauffage individuels (objectif du COMOP : 7 400 ktep/an sur toute la période 2006-2020) malgré une augmentation conséquente du nombre de logements chauffés au bois (passage de 5,75 millions de logements chauffés au bois en 2006 à 9 millions en 2020). Le premier scénario table en effet sur un développement de la biomasse énergie dans le résidentiel individuel que l'on peut qualifier d'idéal au regard de la lutte contre le réchauffement climatique : l'hypothèse d'un important développement de l'utilisation du bois en base seule a été posée afin de limiter les besoins de chauffage couverts par les autres énergies, *sans aucune contrainte sur la maîtrise à 7400 ktep de la consommation de bois des systèmes de chauffage individuels*. Dans le cadre du second scénario, les solutions de chauffage utilisant le bois en tant qu'énergie d'appoint ont été privilégiées afin d'atteindre l'ensemble des objectifs de développement de la biomasse énergie fixée par la PPI Chaleur, notamment la maîtrise à 7400 ktep de la consommation de bois des systèmes de chauffage individuels.

Hormis cette question du respect de la stabilisation des consommations dans le résidentiel individuel, les principales hypothèses posées sont communes aux deux scénarios. Les paragraphes suivants décrivent ces dernières.

¹⁴ Il convient de souligner que cet objectif de réduction des consommations est exprimé en énergie primaire et ne concerne par les énergies renouvelables.

4.2.2.1 Secteur résidentiel

Développement du bois énergie

L'hypothèse d'un développement important du bois énergie (atteinte de 9 millions de logements chauffés au bois domestique en 2020) a été posée via le choix de parts de marché importante des systèmes bois aussi bien dans la construction neuve que sur le marché constitué par les solutions de chauffage à renouveler. La ZAS 3, soit la part du territoire que l'on peut considérer comme rurale, a été prise comme le lieu privilégié du développement de la biomasse énergie du fait de la disponibilité plus importante de la ressource et du moindre risque en termes de qualité de l'air.

En ce qui concerne les combustibles bois utilisés, le paramétrage des hypothèses a été réalisé de manière à conserver la bûche comme le combustible utilisé majoritairement par les appareils domestiques. Il a en effet été considéré que le stock actuel de logements chauffés au bois conservait son combustible d'origine soit la bûche au gré des renouvellements pour l'immense majorité des cas. Toutefois, un usage croissant des granulés et plaquettes a été prévu via la pénétration de ces combustibles en substitution de systèmes utilisant une autre énergie que le bois ou bien dans la construction neuve.

Réhabilitation importante

Le modèle a été paramétré dans l'optique d'atteindre un rythme annuel de 400 000 logements réhabilités d'ici à 2013. A cette fin, il a été considéré que, sur la période 2006-2012, le nombre de réhabilitations par an est d'environ 150 000 logements puis de plus 400 000 à compter de 2013. En termes de ciblage, ces réhabilitations ont été plus volontiers appliquées à des logements anciens situés en zone climatique H1. Il a par ailleurs été estimé que la qualité de réhabilitation correspondait à une réduction de 30% des besoins de chauffage des logements.

4.2.2.2 Secteur tertiaire

Développement du bois énergie

Une pénétration importante du bois énergie a été implémentée au niveau de la construction neuve ainsi qu'en substitution des systèmes existants utilisant une autre énergie que le bois. Le renouvellement des systèmes de chauffage au bois en place en 2006 ne constituait aucun enjeu véritable dans la mesure où ces derniers ne représentent qu'une part marginale de la consommation énergétique liée au chauffage du secteur tertiaire.

Réhabilitation importante

De manière à prendre en considération la volonté de réhabilitation, un taux annuel de réhabilitation de 2% a été implémenté de manière homogène sur tout le territoire. Il a été estimé que les réhabilitations mises en œuvre induisaient une réduction de 30% des besoins de chauffage des logements.

4.2.2.3 Chauffage urbain

Comme indiqué précédemment, le jeu d'hypothèses posées permet une augmentation importante des parts de marché des réseaux de chaleur urbains aussi bien dans le parc résidentiel que tertiaire. A cette croissance des parts de marché a été couplée une pénétration importante de la biomasse énergie dans le mix énergétique des réseaux de chaleur. Cette pénétration a été considérée comme inversement proportionnelle au niveau de ruralité du territoire.

4.2.2.4 Industrie

A l'inverse de ce qui a été réalisé pour les secteurs résidentiel et tertiaire, le secteur industriel a été considéré comme « inerte », c'est-à-dire qu'aucune hypothèse de dynamique (développement ou récession) du secteur industriel n'a été posée. Cependant, l'amélioration de la performance énergétique des industries a été modélisée à l'aide d'un facteur de diminution des consommations à hauteur de 0,5% par an.

En termes de développement de la biomasse énergie, une pénétration importante du bois a été paramétrée dans les branches où il est déjà utilisé de manière non négligeable comme l'industrie du bois et du carton et dans une moindre mesure dans les industries laitières et agroalimentaires.

4.3 Résultats des scénarios prospectifs 2020-2050

4.3.1 Consommations d'énergie en 2020-2050

Les résultats fournis par le modèle sont, quelque soit le scénario, en accord avec les objectifs de développement de la biomasse énergie fixés par la PPI Chaleur hormis en ce qui concerne les consommations de bois du secteur résidentiel pour le scénario 1 (voir tableau 26).

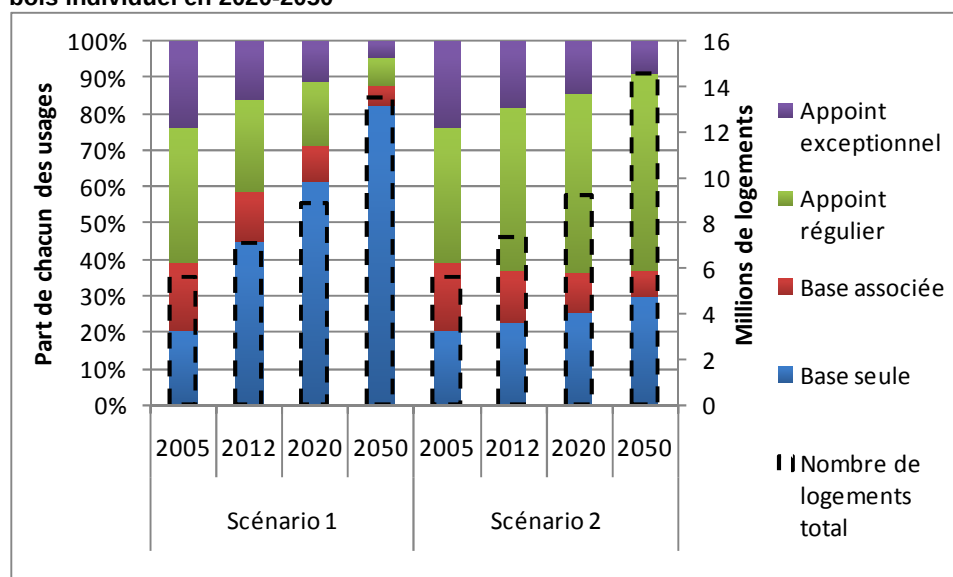
Dans le scénario 1, la consommation de bois des systèmes de chauffage atteint 11 505 ktep en 2020 (contre 7 550 ktep pour le scénario 2) ce qui va à l'encontre de l'objectif de maîtrise des consommations de ce secteur affiché dans la PPI Chaleur¹⁵. La différence d'évolution des structures des usages du bois permet d'expliquer cette divergence entre les deux scénarios. Le nombre de logements chauffés par des systèmes de chauffage au bois individuels utilisés en appoint passe en effet de 3,4 à 5,9 millions entre 2005 et 2020 dans le cadre du scénario 2 contre 2,5 en 2020 pour le scénario 1.

Tableau 26 : Atteinte des objectifs de développement de la biomasse énergie fixés la PPI Chaleur en 2012-2020

Donnée	Secteur	Unité	2005	2006	2012		2020		2050	
					Sc. 1	Sc. 2	Sc. 1	Sc.2	Sc. 1	Sc. 2
PPI Chaleur	Résidentiel individuel*	ktep	-	7 400	7 400		7 400		-	
Modèle	Résidentiel individuel	ktep	6 070	6 551	9 230	7 105	11 505	7 550	15 089	7 657
Ecart	Résidentiel individuel	-	-	-11%	25%	-4%	55%	2%	-	-
PPI Chaleur	Résidentiel individuel	millions de logements		5,75	7,3		9		-	
Modèle	Résidentiel individuel	millions de logements	5,62	5,85	7,17	7,23	8,87	8,98	13,53	13,76
Ecart	Résidentiel individuel	-	-	2%	-2%	-1%	-1%	0%	-	-
PPI Chaleur	Bâtiments	ktep	-	100	300		800		-	
Modèle	Résidentiel collectif	ktep	17	34	132		228		446	
Modèle	Tertiaire	ktep	39	86	347		557		822	
Modèle	Résidentiel collectif et tertiaire	ktep	56	120	479		785		1 268	
Ecart	Résidentiel collectif et tertiaire	-	-	20%	60%		-2%		-	
PPI Chaleur	Réseaux de chaleur	ktep	-	100	300		1200		-	
Modèle	Réseaux de chaleur	ktep	58	96	308		1 183		1 113	
Ecart	Réseaux de chaleur	-	-	-4%	3%		-1%		-	
PPI Chaleur	Industrie	ktep	-	1 200	1 900		3 200		-	
Modèle	Industrie - Bois et sous-produits du bois	ktep	816	974	1 831		3 194		2 748	
Ecart	Industrie	-	-	-19%	-4%		0%		-	
Modèle	Industrie - Liqueurs noires	ktep	714	717	737		1 181		1 016	

* Le libellé « Résidentiel individuel » désigne ici le parc de logements chauffés à l'aide d'un système de chauffage individuel au bois.

Figure 10 : Evolution de la répartition des résidences principales selon leur usage d'un système de chauffage au bois individuel en 2020-2050



¹⁵ Selon l'ADEME, la ressource mobilisable ne serait pas suffisante pour soutenir une demande en bois supérieure à cet objectif.

Ce constat permet de souligner que les objectifs fixés par la PPI Chaleur pour le secteur résidentiel domestique sont atteints dans le cadre du scénario 2 au prix d'un développement de la biomasse énergie majoritairement en tant qu'énergie de chauffage d'appoint dans le parc de logements existants.

Ce choix a des conséquences importantes à une échelle globale dans la mesure où la consommation d'énergie liée au chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire en 2020 est seulement de 10,4% inférieure à celle de 2005 si l'on prend en compte la chaleur renouvelable produite par le chauffage urbain pour le scénario 2. Cette diminution est clairement faible en comparaison aux 19,8% observés dans le cadre du scénario 1 et surtout par rapport à l'objectif de réduction des consommations d'énergie de 38 % d'ici à 2020 (en énergie primaire hors EnR) affiché dans la loi Grenelle 1.

Tableau 27 : Evolution des consommations énergétiques liées au chauffage des parcs bâtis résidentiel et tertiaire en 2020-2050 (en énergie primaire et hors EnR)

Prise en compte de la chaleur renouvelable produite par le chauffage urbain	Secteur	2005	2012		2020		2050	
			Donnée	Evolution par rapport à 2005	Donnée	Evolution par rapport à 2005	Donnée	Evolution par rapport à 2005
Scénario 1								
Sans	Résidentiel (TWh EP)	420,2	400,1	-4,8%	338,3	-19,5%	212,2	-49,5%
	Tertiaire (TWh EP)	131,3	127,1	-3,2%	112,6	-14,2%	112,6	-14,2%
	Total (TWh EP)	551,4	527,2	-4,4%	450,9	-18,2%	324,8	-41,1%
Avec	Résidentiel (TWh EP)	419,5	398,2	-5,1%	332,2	-20,8%	203,5	-51,5%
	Tertiaire (TWh EP)	130,9	126	-3,7%	109,2	-16,5%	108,7	-17,0%
	Total (TWh EP)	550,4	524,2	-4,8%	441,4	-19,8%	312,2	-43,3%
Scénario 2								
Sans	Résidentiel (TWh EP)	420,2	427,2	1,7%	389,8	-7,2%	305,2	-27,4%
	Tertiaire (TWh EP)	131,3	127,1	-3,2%	112,6	-14,2%	112,6	-14,2%
	Total (TWh EP)	551,4	554,3	0,5%	502,4	-8,9%	417,8	-24,2%
Avec	Résidentiel (TWh EP)	419,5	425,3	1,4%	383,6	-8,5%	296,4	-29,4%
	Tertiaire (TWh EP)	130,9	126	-3,7%	109,2	-16,5%	108,7	-17,0%
	Total (TWh EP)	550,4	551,3	0,2%	492,9	-10,4%	405,1	-26,4%

La figure 11 montre, pour les 2 scénarios, l'évolution des consommations énergétiques (GPL, charbon, fioul, électricité, gaz et bois) liées au chauffage du secteur résidentiel sur la période 2005-2050. La figure 12 montre quant à elle l'évolution des consommations de bois dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industriel et chauffage urbain. On constate une moindre réduction des consommations du secteur résidentiel et tertiaire (en énergie primaire et hors EnR) dans le cadre du scénario 2 par rapport au scénario 1 et qui s'explique par le fait que, malgré une augmentation très importante du nombre de logements chauffés au bois, la biomasse ne gagne pas suffisamment de parts de marché en termes de réponse aux besoins de chauffage du secteur résidentiel. Par ailleurs, les résultats de ce même scénario, qui, on le rappelle, respecte l'ensemble des objectifs de développement de la biomasse énergie fixés par la PPI Chaleur, indiquent que la part du résidentiel dans les consommations de bois énergie de l'ensemble du périmètre étudié passe de 87% à 61% en 2020. Selon les documents prospectifs officiels, les secteurs de l'industrie, du chauffage urbain et dans une moindre mesure le tertiaire devront donc soutenir de manière significative l'augmentation des consommations de biomasse énergie. L'évolution après 2020 de la part du résidentiel dans les consommations de bois, soit un maintien à hauteur de 60% pour le scénario 2 et une légère augmentation de 70 à 75% pour le scénario 1, s'explique par la stagnation de la pénétration du bois dans les mix énergétiques des réseaux de chaleur urbains et du secteur industriel qui a été paramétrée.

En termes de répartition territoriale (voir tableau 28 et figure 13)¹⁶, on constate une diminution de la part représentée par la ZAS 3 dans les consommations de bois liées au chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire et des réseaux de chauffage urbain. Cette dernière passe en effet de 76% en 2005 à 70% en 2050 pour le scénario 1 et à 67% pour le scénario 2. La pénétration du bois dans le mix énergétique des réseaux de chauffage urbain apparaît comme l'une des explications à cette tendance à la baisse.

¹⁶ On rappelle une nouvelle fois que les données de consommations du secteur industriel à l'échelle de la ZAS n'ont pu être reconstituées dans le cadre de cette étude. Ce paramètre est déterminant à l'heure d'interpréter les résultats des simulations obtenues en termes de répartition territoriale.

Figure 11 : Evolution des consommations énergétiques liées au chauffage du secteur résidentiel en 2020-2050 pour les scénarios 1 (haut) et 2 (bas)

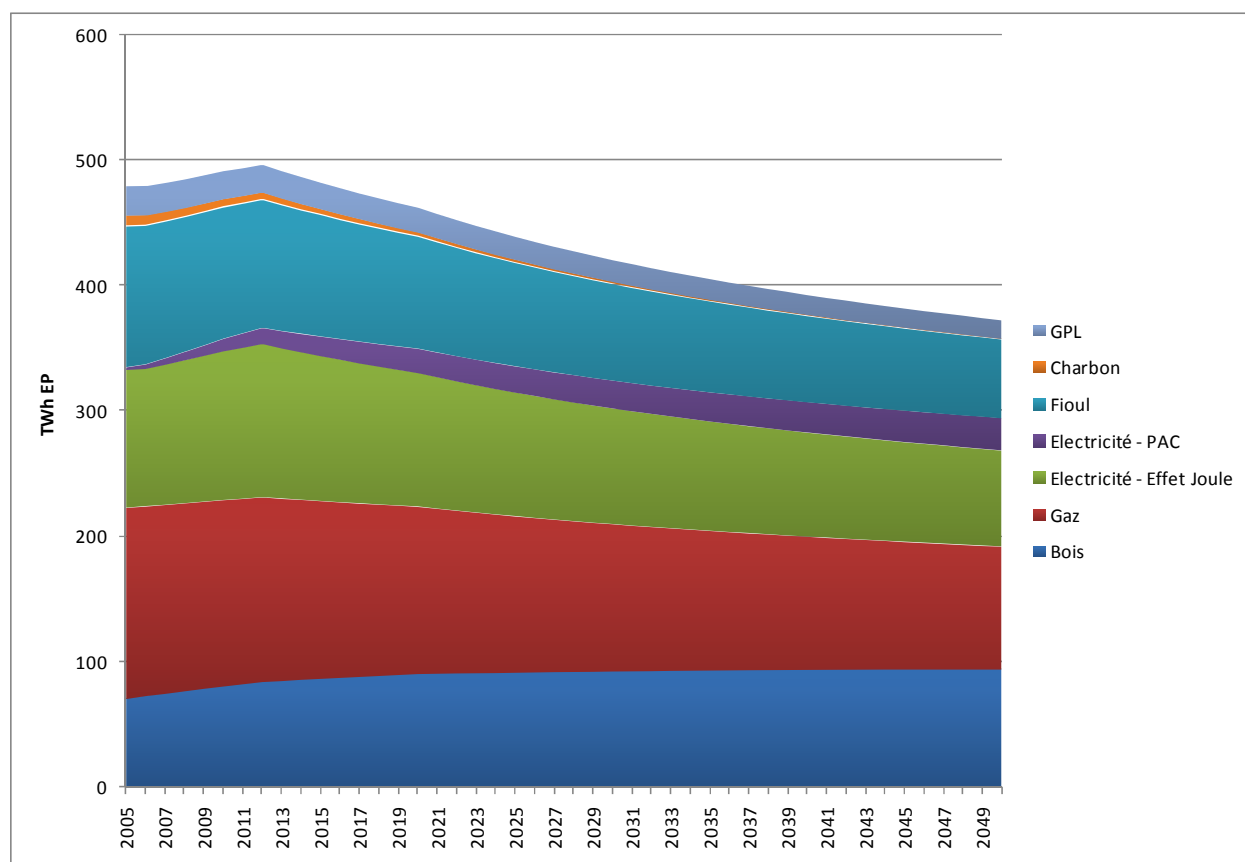
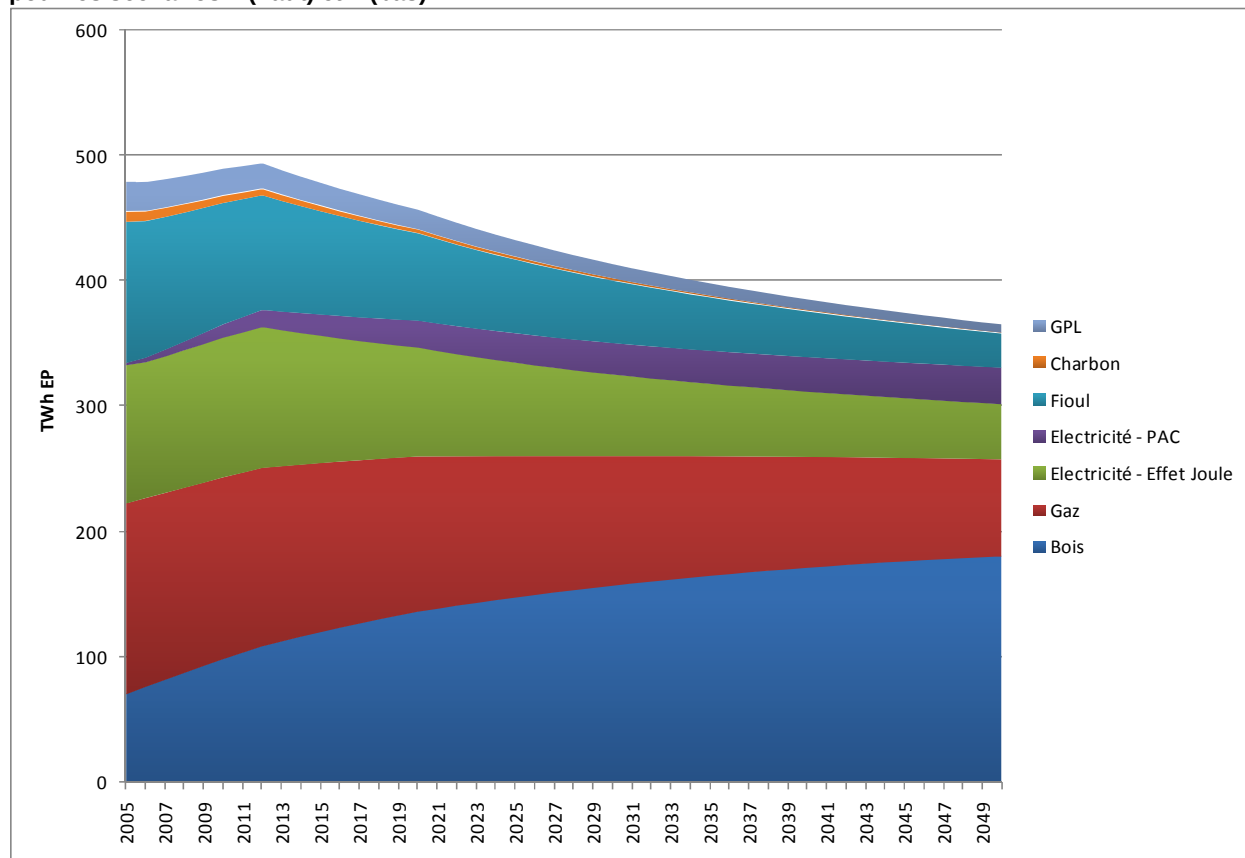


Figure 12 : Evolution des consommations de bois énergie des périmètres étudiés en 2020-2050 pour les scénarios 1 (haut) et 2 (bas)

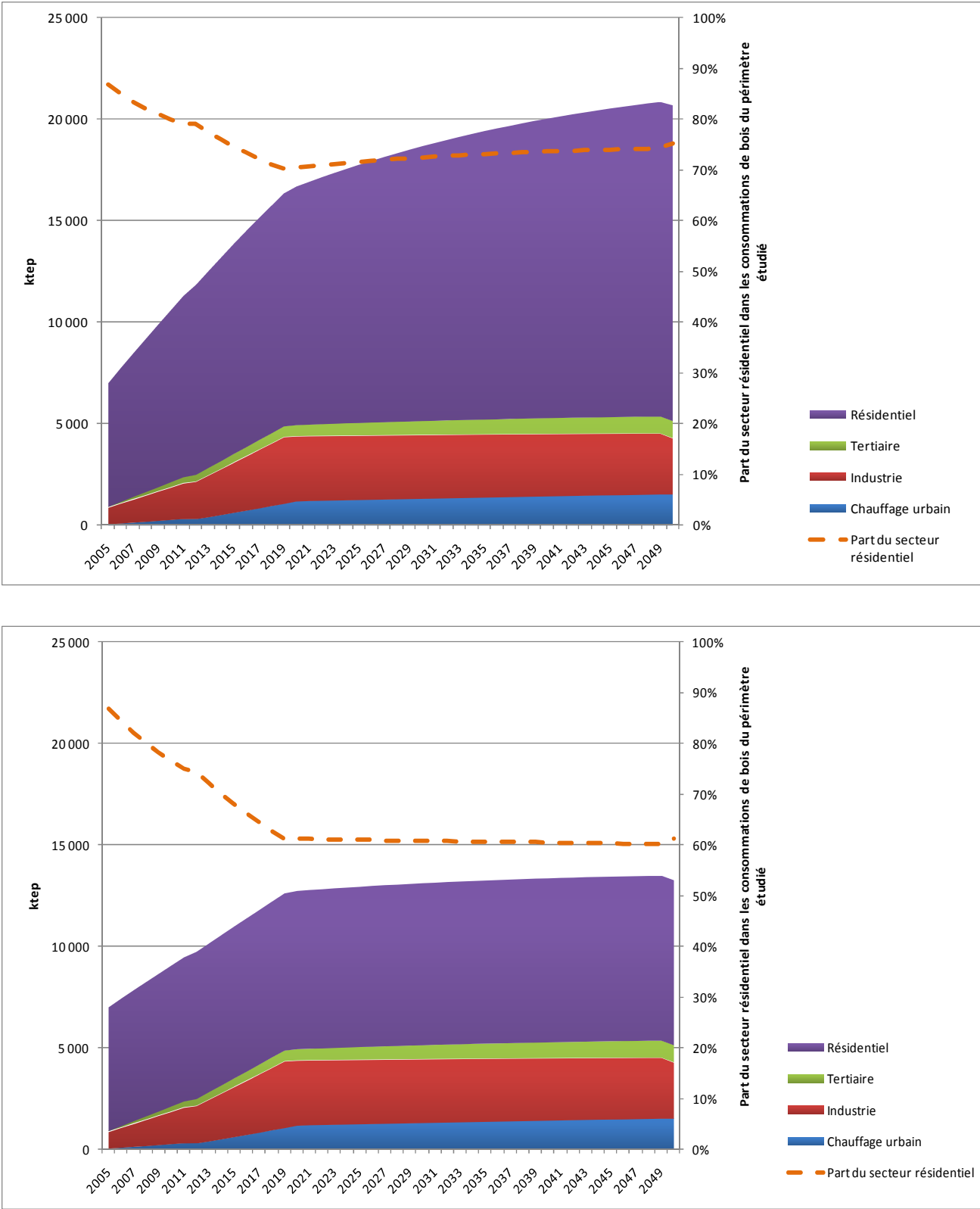
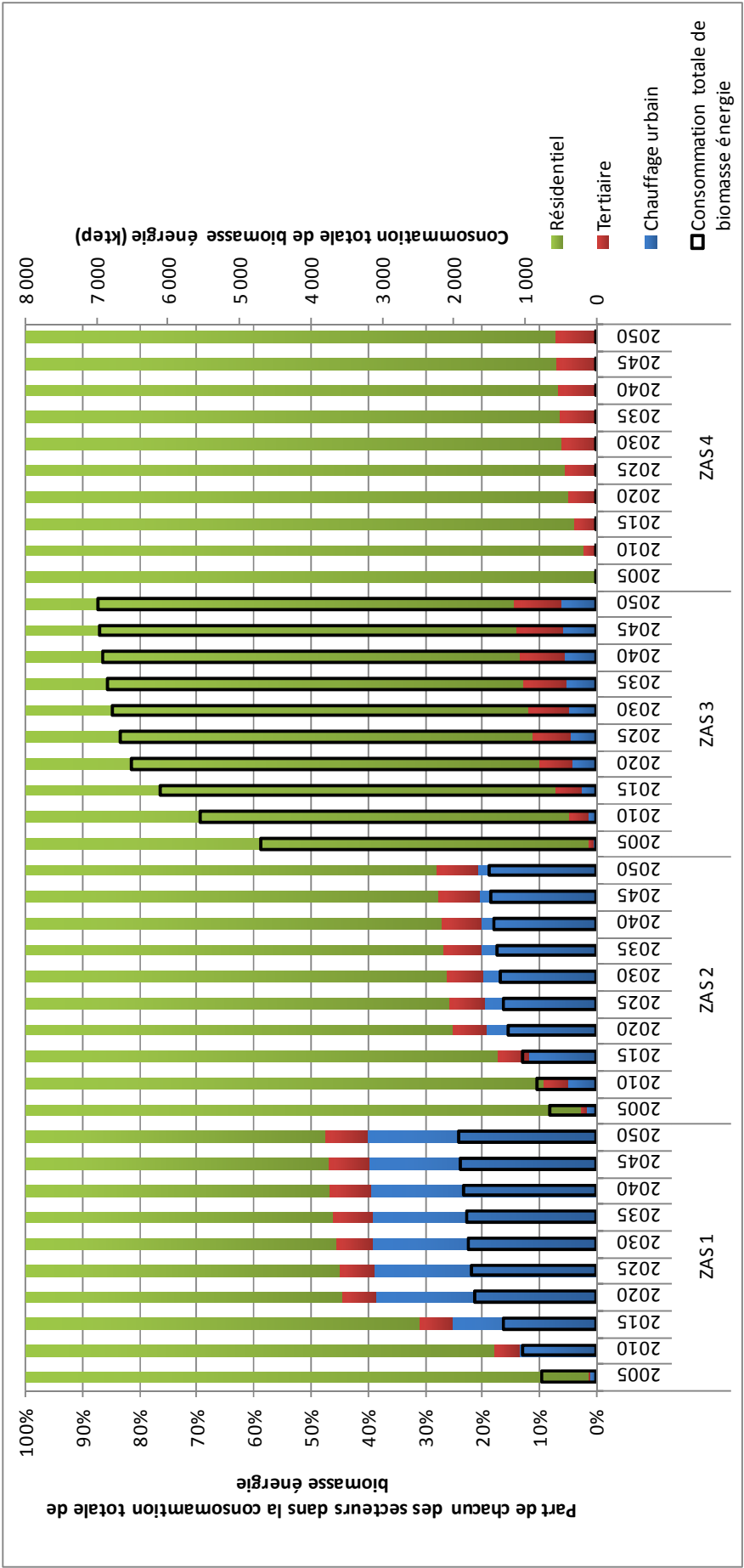


Tableau 28 : Evolution des consommations de bois liées au chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire et des réseaux de chauffage urbain par Zone Administrative de Surveillance de la qualité de l'air en 2020-2050 (en ktep)

Année	Scénario 1						Scénario 2					
	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général	Part de la ZAS3	ZAS 1	ZAS 2	ZAS 3	ZAS 4	Total général	Part de la ZAS3
2005	767	666	4 721	30	6 184	76%	767	666	4 721	30	6 184	76%
2010	1 194	969	6 819	36	9 019	76%	1 035	852	5 556	31	7 475	74%
2015	1 636	1 276	8 430	41	11 383	74%	1 321	1 042	6 118	32	8 513	72%
2020	2 171	1 580	9 677	46	13 473	72%	1 713	1 242	6 531	32	9 518	69%
2025	2 339	1 733	10 463	49	14 584	72%	1 755	1 302	6 671	32	9 760	68%
2030	2 496	1 871	11 102	53	15 521	72%	1 796	1 355	6 782	32	9 966	68%
2035	2 640	1 996	11 613	56	16 305	71%	1 836	1 403	6 868	32	10 139	68%
2040	2 772	2 107	12 017	59	16 955	71%	1 874	1 445	6 930	32	10 281	67%
2045	2 892	2 206	12 328	61	17 487	70%	1 910	1 482	6 971	32	10 395	67%
2050	2 999	2 293	12 562	63	17 917	70%	1 943	1 514	6 996	32	10 485	67%

Figure 13 : Evolution des consommations de bois liées au chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire et des réseaux de chauffage urbain par Zone Administrative de Surveillance de la qualité de l'air en 2020-2050 pour le scénario 2



4.3.2 Emissions de polluants atmosphériques en 2020-2050

4.3.2.1 Clés d'interprétation des résultats

L'analyse des contraintes réglementaires actuelles et à venir en matière de qualité de l'air, des plafonds d'émissions de polluants qui pourraient être mis en place à l'échelle européenne en 2020 ou encore de l'état de référence 2005 sur les concentrations de polluants a permis d'établir des clés d'interprétation des résultats des simulations prospectives en termes d'émissions de GES et de polluants atmosphériques.

Ces clés d'interprétation, décrites ci-après, concernent l'ensemble des émissions en France et pas uniquement celles du périmètre de cette étude.

Pour les émissions de SO₂, NO_x et COVNM, des plafonds d'émission ont été fixés par la directive 2001/81/CE pour fin 2010 pour les pays de l'Union Européenne. Le plafond fixé pour 2010 pour les NO_x ne sera pas atteint dans un contexte de pressions réglementaires pourtant très fortes et étendues suite à la mise en place du programme national de réduction (arrêté du 8 Juillet 2003). Le plafond fixé pour le SO₂ est déjà respecté en 2008 selon les dernières données CITEPA de décembre 2009. Celui pour les COV devrait être atteint mais la situation reste relativement fragile. Le plafond NO_x est celui qui pose le plus de problème de respect en 2010.

Des plafonds beaucoup plus faibles sont envisagés pour 2020. Les PM_{2,5} seront intégrées dans le panel de polluants pris en compte. Une nouvelle directive est attendue et en ce moment, le Protocole de Göteborg est en cours de révision au niveau de la CEE-NU, dans le cadre de la lutte contre la pollution atmosphérique à longue distance. Les émissions de SO₂, NO_x, PM_{2,5} et COVNM ne doivent donc pas augmenter à l'échelle nationale par rapport à l'année de référence 2005. Une diminution des émissions est même vivement conseillée pour ces polluants par rapport à 2005. Il est à noter qu'en 2005 les émissions de NO_x et SO₂ dues à la combustion de la biomasse sont marginales au regard des émissions nationales. Pour les TSP, PM₁₀ et PM_{1,0}, les mêmes contraintes que pour les PM_{2,5} doivent être appliquées car il s'agit de la même problématique : ces polluants sont émis en proportions non négligeables, par la combustion du bois dans le secteur du chauffage domestique en particulier. Ces polluants sont également très surveillés et réglementés en termes de qualité de l'air (cf : plan particules et code de l'environnement).

Pour les HAP, les émissions nationales proviennent essentiellement de la combustion du bois. Une augmentation des émissions de ces polluants par la biomasse énergie aurait donc un impact très fort sur les émissions nationales des HAP. De plus, la concentration dans l'air ambiant du BaP est réglementée (comme pour le CO, le plomb, l'arsenic, etc.). C'est pourquoi une augmentation des HAP est déconseillée.

En ce qui concerne le CO, l'arsenic, le cadmium, le nickel et le plomb, des valeurs de concentrations maximales dans l'air sont définies par la réglementation sur la qualité de l'air. Ces valeurs sont applicables depuis 2005 pour le CO et le plomb et seront applicables en 2012 pour le cadmium, le nickel et l'arsenic. C'est pourquoi une augmentation des émissions de ces polluants est déconseillée.

Enfin, en ce qui concerne le chrome, le cuivre, le mercure, le sélénium, le zinc et les dioxines/furanes (PCDD-F), il n'existe actuellement pas de valeurs limites à respecter, définies par la réglementation sur la qualité de l'air. Cependant, en ce qui concerne les émissions de PCDD-F, celles-ci augmentent avec la teneur en chlore du combustible. La combustion d'importantes quantités de bois potentiellement chargé en chlore, pourrait donc augmenter significativement les émissions. C'est pourquoi aucune recommandation n'est proposée pour ces polluants sauf pour les PCDD-F pour lesquelles une augmentation des émissions sur le plan national est déconseillée.

4.3.2.2 Résultats 2020-2050

En ce qui concerne la lutte contre le réchauffement climatique dans le secteur du chauffage (résidentiel, tertiaire, industriel et réseau de chaleur), on constate que les scénarios élaborés permettent respectivement d'aboutir en 2050 à une réduction de plus de 42 % des émissions de GES par rapport à 2005 pour le scénario 1 et de 34% pour le scénario 2 (voir tableau 29).

Les émissions de polluants caractéristiques de la combustion du bois tels que les HAP, les poussières (TSP, PM10, PM2,5, PM1,0) ou encore les COVNM diminuent notablement sur la période 2005-2020 malgré l'importante croissance des consommations de bois. L'évolution des émissions reste globalement décroissante sur la période 2020-2050 malgré la poursuite du recours massif à la biomasse énergie. A titre d'exemple, on peut relever que **les émissions globales de TSP ont diminué de plus de 40% entre 2005 et 2050 dans le cadre du scénario 1 et de près de 50% pour le scénario 2.**

Cette tendance s'explique notamment par le choix de renouveler à partir de 2006 les appareils de chauffage domestique par des appareils performants. Cet « effet performance » qui joue un rôle majeur pour le secteur résidentiel (voir tableaux 30 et 31) se retrouve dans une moindre mesure dans les secteurs industrie et chauffage urbain où les chaufferies sont désormais systématiquement équipées de filtres à manches ou d'électrofiltres qui permettent de capter les poussières et les polluants particulaires à des niveaux très importants¹⁷.

L'ensemble de ces observations invitent à relativiser les résultats de diminution globale des émissions de polluants caractéristiques du bois dans la mesure où ils font apparaître les hypothèses posées en termes d'évolutions des facteurs d'émissions et de taux de renouvellement des systèmes comme tout à fait déterminantes. Plus concrètement, **ces résultats indiquent que les impacts en termes d'émissions de polluants atmosphériques à l'échelle nationale¹⁸ d'une augmentation aussi conséquente des consommations de bois sont acceptables si un important effort de renouvellement des appareils anciens par des appareils performants est consenti conjointement.**

Sur la vingtaine de polluants atmosphériques étudiés, les NOx sont les seuls polluants pour lesquels une augmentation des émissions à l'horizon 2020 est observée dans les résultats des simulations.

Bien que limitée (+6% pour le scénario 1 toutes énergies et +2% pour le scénario 2 toutes énergies), cette hausse s'avère problématique dans la mesure où la France connaît déjà des difficultés pour respecter le plafond d'émissions correspondant à ces polluants. La part du bois énergie dans les émissions totales (pour le chauffage des secteurs résidentiel, tertiaire, industriel et chauffage urbain) de NOx passe de 10% en 2005 à 32% en 2020 pour le scénario 1 et 27% pour le scénario 2 (Voir Tableau 29). La biomasse énergie joue donc un rôle prépondérant par rapport aux autres énergies dans l'évolution des émissions de NOx. Cette évolution s'explique par une hausse significative des consommations de cette énergie, par le renouvellement du parc de systèmes domestiques de chauffage au bois mais aussi par l'hypothèse prise par défaut dans le modèle prospectif d'absence d'équipement de traitement des NOx pour les chaufferies biomasse. L'évaluation technique et économique de la mise en œuvre d'un traitement de NOx sur les chaufferies biomasse a été réalisée et est présentée au chapitre suivant.

Par ailleurs, les simulations réalisées font apparaître l'existence d'un pic des émissions globales de NOx en 2020 (voir figure 14). La décroissance observée par la suite s'explique notamment par la stagnation de la pénétration du bois dans les mix énergétiques des réseaux de chaleur urbains et du secteur industriel qui a été paramétrée lors de l'élaboration des scénarios.

Enfin, l'analyse de l'évolution des émissions de polluants atmosphériques pour le scénario 2 à l'échelle de la ZAS (voir tableaux 32 et 33) permet d'identifier une stabilité entre 2005 et 2020 dans les ZAS 1 et 2 des émissions des différents métaux. Il convient donc de poursuivre la vigilance et la surveillance de ces métaux. A noter la baisse des émissions de dioxines-furanes issues de la combustion de la biomasse quelque soit la ZAS considérée.

¹⁷ En l'absence de données précises concernant le parc de chaufferies biomasse et en estimant à 20 ans la durée de vie moyenne d'une chaufferie, il a été considéré que l'ensemble du parc de chaufferies au bois et sous-produits du bois industrielles ou destinées à la production de chaleur distribuée par les réseaux de chauffage urbain respectera en 2030 la Valeur Limite d'Emission (VLE) de référence pour les TSP de 30 mg/Nm3 en 2010, soit environ 17 g/GJ (contre 100 g/GJ en moyenne actuellement). Cette hypothèse a été posée dans le but de prendre en compte le fait que, dans ces secteurs, toute nouvelle installation utilisant la biomasse énergie (création ou remplacement d'une chaufferie existante) est équipée d'un système de traitement des poussières (électrofiltre notamment).

¹⁸ L'acceptabilité globale des scénarios réalisés du point de vue de la qualité de l'air est une nouvelle fois à considérer avec précaution dans la mesure où le traitement à une échelle agrégée ne permet pas de déceler des éventuels problèmes de pollution atmosphérique à des échelles locales. L'utilisation d'un pas de temps annuel et non pas mensuel voire journalier invitent également à la prudence quant aux conclusions à tirer des résultats prospectifs obtenus.

Tableau 29 : Evolution des émissions directes de polluants atmosphériques liées à l'utilisation du bois et sous-produits du bois (hors liqueurs noires) pour le chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire, la production de chaleur des réseaux de chauffage urbain et l'utilisation de combustibles dans l'industrie en 2020-2050

Polluant	Unité	Scénario 1						Scénario 2											
		Emissions toutes énergies			Part des émissions liées à l'utilisation du bois dans les émissions toutes énergies			Emissions toutes énergies			Emissions liées à l'utilisation du bois dans les émissions toutes énergies								
		2005	2020	2050	2005	2020	2050	2005	2020	2050	2005	2020	2050						
		Gaz à Effet de Serre (GES)																	
CH ₄	t/an	89 608	45 675	34 415	74 840	33 946	25 965	84%	74%	75%	89 608	43 848	33 472	74 840	31 270	23 849	84%	72%	76%
CO ₂	kt/an	180 388	141 883	103 305	0	0	0	0%	0%	0%	180 388	150 168	119 059	0	0	0	0%	0%	0%
N ₂ O	t/an	7 331	7 736	7 173	2 788	3 457	2 788	36%	36%	48%	7 331	7 305	6 382	1 177	2 128	2 213	16%	29%	35%
Total GES	kt eq CO ₂ /an	184 552	145 240	106 252	1 517	1 515	1 515	1%	1%	2%	184 552	153 349	127 780	1 395	1 386	1 383	1%	1%	1%
Polluants atmosphériques																			
SO ₂	t/an	309 421	252 054	201 147	2 928	7 079	8 844	3%	3%	4%	309 421	257 221	210 394	2 928	5 425	5 735	1%	2%	3%
NO _x	t/an	221 863	235 599	216 422	22 952	76 250	91 955	10%	32%	43%	221 863	226 327	199 872	22 952	67 721	85 075	10%	27%	33%
CO non	t eq CO ₂ /an	238 437	112 618	86 078	228 651	102 995	78 164	91%	91%	91%	238 437	106 252	80 468	228 651	95 328	72 380	91%	90%	90%
CO	t/an	1 458 867	1 072 288	1 047 191	1 323 088	972 325	971 633	91%	91%	93%	1 458 867	960 798	858 831	1 323 088	895 696	775 462	91%	89%	91%
As	kg/an	3 474	3 096	3 052	1 952	1 873	1 994	56%	61%	65%	3 474	2 820	2 591	1 952	1 602	1 522	56%	67%	69%
Cd	kg/an	662	657	705	288	284	301	43%	43%	43%	662	615	634	288	242	230	43%	39%	36%
Cr	kg/an	13 214	12 377	9 856	13 239	9 816	7 332	75%	75%	77%	13 214	11 008	10 429	9 656	7 927	7 528	73%	72%	72%
Cu	kg/an	9 178	8 395	8 295	6 363	6 473	6 749	63%	74%	78%	9 178	7 414	6 798	6 363	5 223	4 955	69%	71%	73%
Hg	kg/an	4 594	3 490	3 490	164	172	165	4%	4%	5%	4 594	3 905	3 447	164	145	140	4%	4%	4%
Ni	kg/an	85 028	48 602	48 602	2 260	2 237	2 237	3%	3%	5%	85 028	57 211	48 067	2 260	1 855	1 762	3%	3%	3%
Pb	kg/an	2 174	20 975	22 119	18 794	17 801	18 794	85%	85%	85%	2 174	18 354	17 740	18 490	15 880	14 415	85%	83%	81%
Se	kg/an	2 104	1 680	1 655	1 438	1 385	1 438	68%	74%	79%	2 104	1 656	1 519	1 438	1 181	1 121	68%	71%	74%
Zn	kg/an	71 566	60 046	70 842	57 359	60 568	60 568	83%	84%	85%	71 566	59 601	56 733	59 680	48 913	46 417	82%	82%	82%
PCDD/F	mg I-TEQ/an	47 898	42 950	45 952	19 210	15 445	16 872	36%	36%	37%	47 898	39 257	39 631	19 210	10 560	39%	30%	27%	27%
8 HAP	kg/an	49 500	35 660	38 891	49 901	36 272	36 700	99%	99%	99%	49 500	27 577	28 572	49 901	27 116	25 254	99%	98%	98%
BaP	kg/an	4 193	3 021	3 139	3 005	3 125	3 125	100%	99%	100%	4 193	2 330	2 170	4 170	2 313	2 154	100%	99%	99%
BaF	kg/an	4 895	3 500	3 568	4 870	3 580	3 521	96%	96%	96%	4 895	2 755	2 530	4 870	2 597	2 418	96%	94%	96%
BaH	kg/an	3 040	2 864	2 175	2 857	2 052	2 131	94%	94%	95%	3 040	1 776	1 557	2 857	1 573	1 470	94%	92%	94%
IndP ₁	kg/an	2 439	1 753	1 819	2 425	1 745	1 819	100%	100%	100%	2 439	1 352	1 258	2 429	1 344	1 252	100%	99%	99%
EqB ₁ P _a	kg/an	1 244	893	928	1 234	886	923	99%	99%	99%	1 244	695	635	1 233	676	628	99%	98%	98%
BaA	kg/an	6 688	4 820	5 008	6 683	4 807	5 001	100%	100%	100%	6 688	3 708	3 460	6 683	3 694	3 440	100%	100%	100%
BaK _a	kg/an	396	287	295	396	280	290	97%	97%	98%	396	226	209	396	219	203	97%	97%	97%
FluorA	kg/an	26 638	19 193	19 923	26 498	19 105	19 680	99%	100%	100%	26 638	14 798	13 749	26 498	14 686	13 679	99%	99%	99%
TSP	t/an	154 987	104 240	90 715	103 256	62 738	94 740	70%	65%	69%	154 987	95 140	79 746	103 256	57 698	49 818	70%	61%	62%
PM ₁₀	t/an	136 638	87 991	76 387	102 274	63 235	86 355	76%	72%	76%	136 638	79 338	66 063	102 274	53 653	46 080	76%	67%	70%
PM _{2.5}	t/an	122 757	77 191	67 101	99 697	61 012	77 881	81%	79%	84%	122 757	68 732	57 036	99 697	51 544	44 165	81%	77%	77%
PM ₁₀	t/an	115 934	70 959	61 601	99 189	61 601	64 061	85%	83%	85%	115 934	62 834	51 860	98 211	50 103	48 704	85%	80%	82%

Tableau 30 : Evolution des émissions directes de polluants atmosphériques par périmètre étudié en 2020-2050

		Scénario 1												Scénario 2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Polluant	Unité	Industrie						Résidentiel						Chauffage urbain						Tertiaire						Gaz à Effet de Serre (GES)						Polluants atmosphériques																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
		2005	2020	2050	2060	2070	2080	2005	2020	2050	2060	2070	2080	2005	2020	2050	2060	2070	2080	2005	2020	2050	2060	2070	2080	2005	2020	2050	2060	2070	2080	2005	2020	2050	2060	2070	2080																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
CH ₄	t	360	7164	516	7164	6103	6939	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746	3746</

Tableau 31 : Evolution des émissions directes de polluants atmosphériques liées à l'utilisation du bois et sous-produits du bois (hors liqueurs noires) par périmètre étudié en 2020-2050

		Scénario 1												Scénario 2											
Polluant	Unité	Chauffage urbain			Industrie			Tertiaire			Gaz à Effet de Serre (GES)			Chauffage urbain			Industrie			Tertiaire					
		2005	2020	2050	2005	2020	2050	2005	2020	2050	2005	2020	2050	2005	2020	2050	2005	2020	2050	2005	2020	2050			
Polluants atmosphériques																									
SO ₂	t/an	24	495	640	34	1326	1149	24	495	640	34	1326	1149	24	495	640	34	1326	1149	24	495	640			
NO _x	t/an	402	8 264	10 594	6 829	26 718	22 987	402	8 264	10 594	6 829	26 718	22 987	402	8 264	10 594	6 829	26 718	22 987	402	8 264	10 594			
CO	t/an	12	238	307	84	641	552	12	238	307	84	641	552	12	238	307	84	641	552	12	238	307			
Ac	t/an	602	12 371	16 089	9 528	33 397	28 734	602	12 371	16 089	9 528	33 397	28 734	602	12 371	16 089	9 528	33 397	28 734	602	12 371	16 089			
Cd	t/an	3	200	211	324	342	186	23	200	211	324	342	186	23	200	211	324	342	186	23	200	211			
Cr	t/an	3	29	31	48	50	27	33	29	31	48	50	27	33	29	31	48	50	27	33	29	31			
Cu	t/an	113	989	1 044	1 605	1 633	916	113	989	1 044	1 605	1 633	916	113	989	1 044	1 605	1 633	916	113	989	1 044			
Hg	t/an	75	652	689	1 055	1 116	606	75	652	689	1 055	1 116	606	75	652	689	1 055	1 116	606	75	652	689			
Ni	t/an	2	17	18	27	29	16	2	17	18	27	29	16	2	17	18	27	29	16	2	17	18			
Pb	t/an	26	231	244	376	396	216	26	231	244	376	396	216	26	231	244	376	396	216	26	231	244			
Sa	t/an	17	147	156	117	122	82	17	147	156	117	122	82	17	147	156	117	122	82	17	147	156			
Zn	t/an	688	6 103	6 443	9 902	10 444	5 686	688	6 103	6 443	9 902	10 444	5 686	688	6 103	6 443	9 902	10 444	5 686	688	6 103	6 443			
PCDD/F	mgI.EQ/ton	86	842	889	1366	1441	782	86	842	889	1366	1441	782	86	842	889	1366	1441	782	86	842	889			
HAP	t/an	20	170	180	277	292	168	20	170	180	277	292	168	20	170	180	277	292	168	20	170	180			
BAP	t/an	3	15	16	24	25	14	3	15	16	24	25	14	3	15	16	24	25	14	3	15	16			
BAF	t/an	3	17	18	27	28	16	3	17	18	27	28	16	3	17	18	27	28	16	3	17	18			
MePn	t/an	11	11	11	17	18	11	11	11	11	17	18	11	11	11	11	17	18	11	11	11	11			
MePy	t/an	4	4	4	9	9	4	4	4	4	9	9	4	4	4	4	9	9	4	4	4	4			
BaA	t/an	0	4	4	4	4	4	0	4	4	4	4	4	0	4	4	4	4	4	0	4	4			
BbA	t/an	0	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	0	2	2			
FluorA	t/an	10	90	96	14	105	84	10	90	96	14	105	84	10	90	96	14	105	84	10	90	96			
TEP	t/an	115	1 031	1 093	2 414	3 002	1 854	115	1 031	1 093	2 414	3 002	1 854	115	1 031	1 093	2 414	3 002	1 854	115	1 031	1 093			
PM ₁₀	t/an	86	861	905	2 725	2 874	1 555	86	861	905	2 725	2 874	1 555	86	861	905	2 725	2 874	1 555	86	861	905			
PM _{2.5}	t/an	86	751	793	2 271	2 395	1 258	86	751	793	2 271	2 395	1 258	86	751	793	2 271	2 395	1 258	86	751	793			
PM ₁₀	t/an	74	650	685	1 871	1 981	1 075	74	650	685	1 871	1 981	1 075	74	650	685	1 871	1 981	1 075	74	650	685			

Figure 14 : Evolution des émissions de NOx liées aux consommations de bois et sous-produits du bois des
périmètres étudiés en 2020-2050

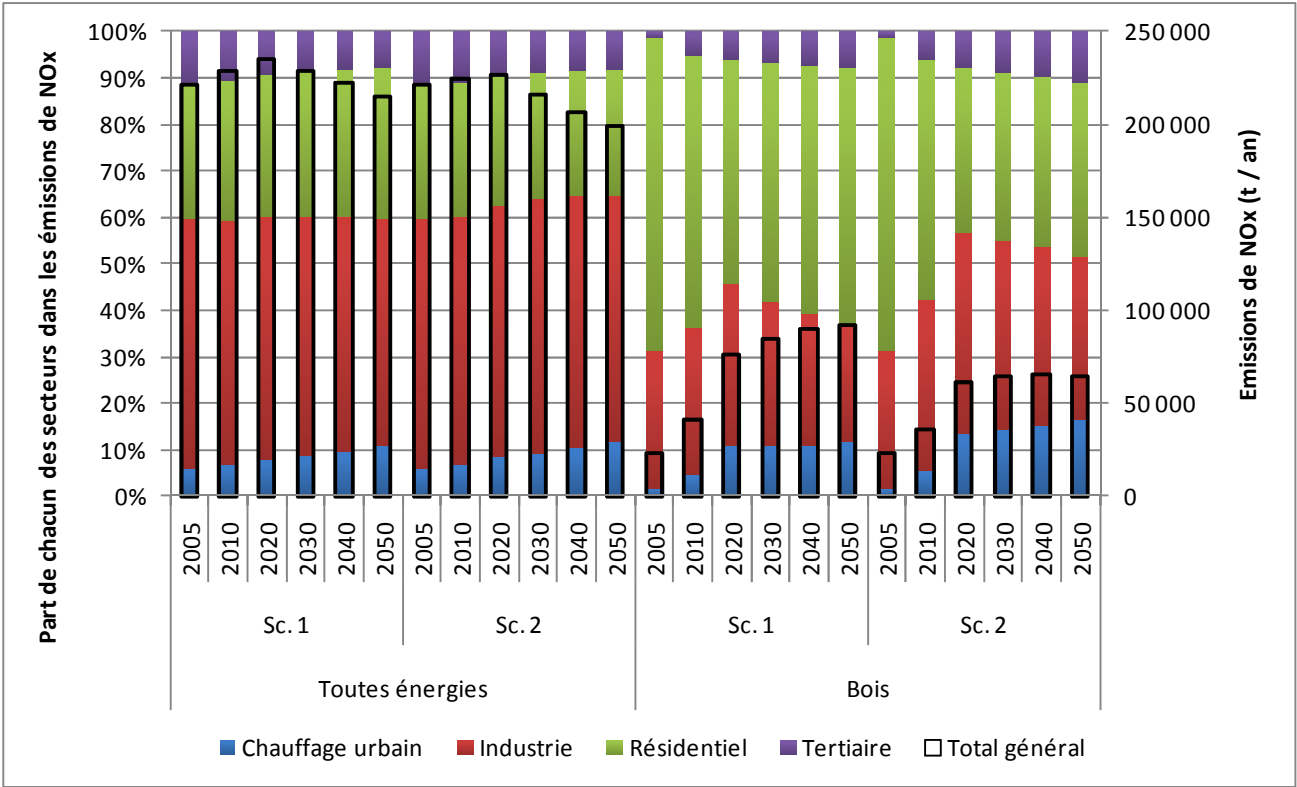


Tableau 32 : Evolution des émissions directes de polluants atmosphériques induites par le chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire et la production de chaleur des réseaux de chauffage urbain par ZAS en 2020-2050

Polluant	Unité	Scénario 1										Scénario 2									
		ZAS 1					ZAS 2					ZAS 3					ZAS 4				
		2008	2020	2030	2040	2050	2008	2020	2030	2040	2050	2008	2020	2030	2040	2050	2008	2020	2030	2040	2050
CH4	ton	14 400	6 143	4 695	2 780	20 302	4 334	201	125	124	6 281	4 601	9 281	4 591	3 142	93 720	4 341	9 061	24 031	19 061	191
CO2	ton	39 450	31 845	22 622	11 058	8 250	16 382	960	403	39 450	32 622	25 145	10 931	10 120	41 220	32 730	22 780	660	193	493	493
N2O	ton	1645	1145	1384	69	2	28	28	27	1545	1561	1282	614	694	2 002	43 204	2 002	1872	25	27	27
GES	ton	46 267	32 003	25 145	11 734	12 550	654	972	414	46 267	32 250	25 444	11 412	10 100	43 204	31 522	23 770	684	196	495	495
SO2	ton	27 837	13 058	6 978	3 375	41 895	24 655	11 744	256	24 72	11 642	9 186	11 642	4 378	41 895	24 655	9 872	260	260	175	175
NOx	ton	41 364	40 822	37 000	17 734	17 760	654	678	695	41 364	39 811	34 766	17 345	17 310	41 895	34 766	17 310	694	64	535	535
COMMI	ton	31 375	14 324	14 435	14 435	60 272	1186	894	323	31 375	13 602	10 071	25 044	11 385	9 384	173 953	72 144	64 270	1186	463	304
CO	ton	87 852	135 210	132 758	132 758	132 758	840	4 181	3 755	197 822	127 631	100 372	143 000	101 051	99 183	1032 741	626 652	462 331	8440	3 856	2 975
As	kg/an	435	448	432	239	238	227	1097	1207	3	8	435	467	423	227	21	290	138	881	861	5
Cr	kg/an	208	238	65	65	87	58	1	1	208	222	262	58	64	80	159	147	160	1	1	1
Cr	kg/an	1827	2 219	2 455	1 182	1 500	1038	5178	578	1827	2 017	2 957	1038	1044	1280	5341	4 584	4 584	40	22	22
Co	kg/an	915	1 045	1 145	701	882	4 381	3 382	3 144	915	953	923	638	610	724	4 181	2 708	2 708	27	15	14
Hg	kg/an	575	428	445	300	182	300	188	188	575	417	438	122	88	108	305	188	148	2	2	1
PM10	kg/an	14 617	5 583	5 222	1 258	658	5127	2 775	1 651	14 617	5 545	5 142	4 238	1 031	643	5127	2 478	1 450	132	117	110
PM2.5	kg/an	3 220	4 250	4 834	2 240	2 819	1180	918	1145	3 220	3 184	4 180	1 901	1 995	2 430	1190	7 802	8 205	775	42	40
Se	kg/an	244	256	278	161	201	945	765	678	244	225	228	195	141	185	945	615	624	6	4	4
Zn	kg/an	9 230	12 030	13 671	6 992	9 910	5 932	31 652	36 138	9 230	10 845	11 962	5 823	6 130	7 429	39 452	25 342	25 179	242	138	129
PCDD/F	kg/1000t	20 194	20 410	22 964	5 454	5 414	19 424	19 956	14 578	20 194	20 331	22 071	5 402	5 031	5 624	19 424	11 886	9 900	129	58	37
BAP	kg/an	6 495	4 270	4 465	3 755	4 022	37 074	27 052	20 056	6 495	3 445	3 050	5 341	3 242	3 375	37 074	20 428	8 985	250	112	89
BaP	kg/an	547	381	38	375	342	3140	2 282	2 286	547	260	450	273	285	285	3 140	1 728	1 599	22	9	7
BaF	kg/an	655	453	454	375	386	3164	2 625	2 707	655	327	322	531	325	325	3 164	2 012	1 844	25	11	8
BaF	kg/an	417	278	259	235	240	2 254	1 624	1 648	417	227	193	235	206	207	2 254	1 296	1 141	16	7	5
BaF	kg/an	317	212	218	184	186	1 624	1 124	1 148	317	165	148	165	156	166	1 624	1 002	924	13	5	4
BaF	kg/an	181	101	111	132	131	930	678	704	181	84	74	132	89	93	930	506	467	6	3	2
BaF	kg/an	659	603	603	505	545	5102	3 666	3 188	659	450	406	719	435	450	5102	2 798	2 952	35	15	11
BaF	kg/an	91	35	32	30	32	252	213	221	91	25	42	25	25	27	252	182	160	2	1	1
BaF	kg/an	3 474	2 230	2 399	2 007	2 175	19 956	14 654	15 183	3 474	1 626	1 611	2 889	1 739	1 194	19 956	11 004	9 172	139	68	44
FluoA	kg/an	18 115	10 128	9 871	6 295	7 642	85 762	61 336	46 205	18 115	9 867	7 702	13 328	7 624	7 029	85 762	44 008	37 959	619	279	199
FluoB	kg/an	17 132	9 122	8 307	7 783	7 071	81 972	48 488	43 368	17 132	9 058	7 111	12 444	7 132	6 509	81 972	41 571	34 842	595	258	188
FluoC	kg/an	18 345	9 884	7 845	7 445	6 748	79 857	47 080	41 984	18 345	8 521	6 771	12 304	6 302	5 807	79 857	40 144	33 671	555	247	179
FluoD	kg/an	18 584	9 102	7 211	7 132	6 432	78 116	45 722	40 184	18 584	8 125	6 277	11 808	5 834	5 341	78 116	38 341	32 547	555	244	173

Tableau 33 : Evolution des émissions directes de polluants atmosphériques liées à l'utilisation du bois et sous-produits du bois (hors liqueurs noires) pour le chauffage des secteurs résidentiel et tertiaire et la production de chaleur des réseaux de chauffage urbain par ZAS en 2020-2050

Polluant	Unité	Scénario 1										Scénario 2									
		ZAS 1		ZAS 2		ZAS 3		ZAS 4		ZAS 1		ZAS 2		ZAS 3		ZAS 4		ZAS 1		ZAS 2	
		2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
CH4	ton	9 762	4 470	3 127	3 684	2 778	95 950	25 205	19 452	98	9 762	3 930	2 946	2 900	2 900	17 343	395	0	0	0	0
CO2	ton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N2O	ton	129	363	962	111	264	790	1 618	2 804	11	129	266	225	293	780	1 052	0	0	0	0	0
GES	kg/an	22	202	278	155	171	1433	1031	165	5	247	172	162	203	135	826	727	19	5	5	5
SO2	ton	321	926	1 288	653	1 023	1379	4 105	5 356	28	321	724	846	698	1979	3 028	12	13	14	10	11
NOx	ton	1380	10 016	12 783	1786	9 870	12 820	22 822	45 099	75	1380	8 209	9 789	6 856	12 300	25 321	79	100	100	111	111
COMMA	ton	29 866	13 483	9 326	11 936	8 428	171 468	77 182	59 889	302	29 866	24 287	8 303	8 320	171 468	53 188	165	435	285	285	285
CO	ton	188 448	120 221	122 718	140 345	105 924	1 007 243	718 800	719 702	3 954	188 448	140 345	98 052	94 620	1 007 243	659 047	6 599	3 438	2 782	2 782	2 782
Ac	kg/an	202	289	338	175	210	1242	1022	1894	6	202	258	258	221	1242	886	8	4	4	4	4
Cl	kg/an	30	45	51	28	32	183	868	18	1	30	39	40	27	182	124	1	1	1	1	1
Cr	kg/an	10 001	1 179	1 874	888	1 839	6 146	5 058	5 886	38	10 001	888	1 332	901	6 146	4 036	38	21	20	20	20
Cu	kg/an	660	979	1 104	571	685	4 654	3 358	3 865	25	660	571	842	571	4 654	2 747	25	14	13	13	13
Hg	kg/an	17	27	31	15	19	105	97	113	1	17	24	24	17	105	77	1	0	0	0	0
Ni	kg/an	234	346	392	203	243	1438	1184	137	7	234	289	312	211	206	1438	944	9	5	5	5
Pb	kg/an	1937	2 832	3 206	1858	1 951	11759	9 807	1127	95	1937	2 446	2 592	1724	2 001	11759	7728	72	41	41	39
Sr	kg/an	149	220	249	129	155	916	753	872	4	149	180	198	134	163	916	620	6	3	3	3
Zn	kg/an	6 177	9 125	10 332	5 344	6 459	37 822	31 322	38 566	185	6 177	7 880	8 222	5 544	6 739	37 822	24 906	235	131	129	129
PCDD/F	mg-TEQ/an	2 093	2 210	2 555	1786	1687	12 895	10 954	11 275	81	2 093	1786	1653	1437	12 895	7 223	6 857	81	39	38	33
PAH	kg/an	6 346	4 362	4 405	5 257	3 706	38 768	26 572	27 865	266	6 346	5 257	2 866	3 184	3 326	36 768	20 295	255	105	84	84
BNF	kg/an	541	363	376	448	395	3135	2 388	2 384	22	541	294	253	222	255	1723	1596	22	8	7	7
BNF	kg/an	608	468	423	502	356	3350	2 174	2 885	38	608	356	285	318	3350	1834	1732	24	11	8	8
BNF	kg/an	371	248	256	307	233	2147	1362	1625	15	371	194	172	165	2147	1175	1088	15	6	5	5
BNF	kg/an	315	211	217	263	193	1826	1308	1584	10	315	165	147	135	1826	1005	927	10	5	4	4
BNF	kg/an	160	107	111	133	93	927	679	704	4	160	79	74	63	927	604	468	4	3	3	3
BNF	kg/an	605	501	600	777	604	5014	3 625	2 181	18	605	403	404	404	5 004	2 703	2 448	18	15	15	15
BNF	kg/an	50	34	35	44	28	281	225	225	2	50	27	25	27	288	85	148	2	1	1	1
FluorA	kg/an	34 306	2 308	2 306	2 444	2 004	19 911	14 506	9 561	74	34 306	2 444	1 607	1 605	19 911	9 946	10 133	138	58	47	47
TPP	ton	14 022	8 830	8 844	11 488	7 294	78 722	47 908	49 141	204	14 022	7 526	6 594	6 442	78 722	39 725	34 448	208	238	186	186
PM10	ton	93 363	8 233	7 542	10 904	6 708	74 762	46 048	42 333	522	93 363	6 070	5 658	5 529	74 762	37 207	32 344	522	224	165	165
PM2.5	ton	93 363	7 944	7 226	10 657	6 572	71 101	43 038	41 023	520	93 363	5 827	5 778	5 658	71 101	35 348	31 382	520	208	165	165
PM10	ton	93 363	7 705	6 926	10 545	6 397	72 340	42 883	39 735	595	93 363	5 595	5 545	5 445	72 340	35 628	30 188	595	204	165	165

4.3.3 Systèmes de traitement des NOx et coûts associés

4.3.3.1 Etat des lieux

Une revue complète des systèmes de dépollution existants pour traiter les NOx a été réalisée dans le cadre de l'étude et est disponible intégralement dans le rapport. Cette synthèse présente les systèmes de traitement des NOx. Le tableau 34 présente les systèmes recensés et les coûts associés, qui peuvent être directement comparés à ceux d'EGTEI (Expert Group on Techno-Economic Issues) présentés à titre indicatif au tableau 35.

Les coûts des systèmes de traitement des NOx par SNCR pour des installations de combustion de biomasse sont compris entre 3 000 et 5 000 €/t de NOx évitée et entre 10 000 et 16 000 €/t de NOx évitée pour les systèmes SCR. A l'exception du secteur des chaudières au gaz naturel utilisées dans le secteur du raffinage, les coûts de de-NOx pour la combustion de la biomasse sont très largement supérieurs à ceux issus du modèle EGTEI pour d'autres process (raffinage, production de verre, etc.)

Tableau 34 : Systèmes de dépollution recensés dans le cadre de l'étude

Secteurs concernés	Système	Surcoûts			Taux de réduction des émissions de NOx*
		Investissement et installation	Maintenance (Coût annuel)	Unité	
Résidentiel Collectif, Tertiaire	Réduction non catalytique sélective (SNCR)	5 000		€ par tonne de NOx évitée	50%
	Réduction catalytique sélective (SCR)	16 000			20%
Industriel, Chauffage urbain	Réduction non catalytique sélective (SNCR)	3 000			50%
	Réduction catalytique sélective (SCR)	10 000			20%

* Emissions Avec Système de Dépollution = Emissions Sans Système de Dépollution * Facteur de diminution

Tableau 35 : Données issues du modèle EGTEI concernant le traitement des NOx

Secteur industriel considéré	Système	Coûts
Raffinage : Chaudières au fuel lourd	Mesures primaires permettant une réduction de 30 % des émissions	1 600 € par t NOx évitée
	Mesures secondaires (mix SNCR et SCR) permettant une réduction de 60 à 85 % des émissions	5 300 € par t NOx évitée
Raffinage : Chaudières au gaz naturel	Mesures primaires permettant une réduction de 30 % des émissions	1 940 € par t NOx évitée
	Mesures secondaires (mix SNCR et SCR) permettant une réduction de 60 à 85 % des émissions	20 800 € par t NOx évitée
Raffinage : FCC (Fluid Catalytic Cracking)	Mesures secondaires permettant une réduction de 80 % des émissions	2 100 € par t NOx évitée
Installations de combustion de plus de 500 MW - Charbon	Mesures primaires et SCR	827 à 2 320 € par t NOx évitée
Installations de combustion de plus de 500 MW - Fuel lourd	Mesures primaires et SCR	5 790 € par t NOx évitée
Installations de combustion de plus de 500 MW - Gaz naturel	Mesures primaires et SCR	2 930 € par t NOx évitée
Acide nitrique	SCR permettant 80 % d'efficacité	320 € par t NOx évitée
	SCR permettant 94 % d'efficacité	580 € par t NOx évitée
Production de verre	Mesures primaires permettant une réduction de 65 % des émissions	220 € par t NOx évitée
	Mesures secondaires permettant une réduction de 82 % des émissions	1 880 € par t NOx évitée
Production de ciment	Mesures primaires permettant une réduction de 25 % des émissions	200 € par t NOx évitée
	Mesures secondaires permettant une réduction de 72 % des émissions	740 € par t NOx évitée

4.3.3.2 Evaluation économique de la mise en place de systèmes de traitement des NOx

Dans la mesure où les scénarios élaborés ont fait apparaître une augmentation des émissions de NOx jugée problématique au regard notamment du respect du plafond d'émissions correspondant à ce polluant, une évaluation de l'impact d'une politique contraignante de réduction des émissions d'oxydes d'azote (NOx) aussi bien en termes de qualité de l'air que de coûts associés a été réalisée. A cette fin, un raisonnement en surcoûts a été adopté, c'est-à-dire que seuls les coûts d'investissement et de maintenance liés à la mise en place des solutions de-NOx ont été évalués en considérant que la référence correspond au maintien des exigences actuelles en termes de qualité de l'air.

Le choix a été fait de tester l'influence de l'équipement de l'ensemble des chaudières industrielles et chaufferies urbaines au bois de systèmes de réduction secondaires des émissions de NOx (de-NOx), soit de systèmes de réduction non catalytique sélective (SNCR) soit de systèmes de réduction catalytique sélective (SCR). Il n'existe pas à l'heure actuelle de système de réduction de NOx pour le résidentiel individuel.

La mise en place des systèmes de dépollution choisis sur les chaufferies industrielles et les installations de chauffage urbain utilisant le bois permet une réduction des émissions de NOx sur la période 2005-2050 (voir tableau 36). **A l'horizon 2020 les émissions globales de NOx du secteur toutes énergies diminuent de près de 6% pour le scénario 1 et de près de 11% pour le scénario 2 avec la mise en place de systèmes SCR. Avec les systèmes SNCR, ces diminutions sont respectivement de 2% et 6%.** La seule action sur les parts des secteurs de l'industrie et du chauffage urbain alimentées par de la biomasse permet donc une réduction des émissions de NOx et rend acceptable en termes d'émissions de polluants atmosphériques, tout du moins à l'échelle nationale, les scénarios élaborés dans le cadre de cette étude.

Du point de vue économique (voir tableau 37), **les surcoûts d'investissement liés à la mise en place des systèmes de-NOx dans l'industrie et la production de chaleur des réseaux de chauffage urbain s'élèvent à près de 52 millions d'euros par an en 2020 avec la mise en place de systèmes SNCR et à 280 millions d'euros par an en 2020 avec la mise en place de système SCR.**

La mise en place de solution de traitement catalytique ou non sur des installations biomasse de puissances importantes est donc à étudier au cas par cas, afin de contribuer au mieux localement mais aussi globalement à la réduction des NOx.

Tableau 36 : Effet des systèmes de dépollution sur l'évolution des émissions de NOx en 2020-2050

Energie	Secteur	Système de-NOx	Scénario 1			Scénario 2		
			2005	2020	2050	2005	2020	2050
Toutes énergies	Résidentiel	Aucun	64 413	71 911	69 990	64 413	62 640	53 240
	Tertiaire	Aucun	25 175	22 371	16 430	25 175	22 371	16 430
	Chauffage urbain	Aucun	12 894	18 645	23 457	12 894	18 645	23 457
		SCR	12 894	12 034	14 901	12 894	12 034	14 901
		SNCR	12 894	14 513	18 110	12 894	14 513	18 110
	Industrie	Aucun	119 380	122 671	105 545	119 380	122 671	105 545
		SCR	119 380	101 297	87 155	119 380	101 297	87 155
		SNCR	119 380	109 313	94 051	119 380	109 313	94 051
	Total	Aucun	221 863	235 599	215 422	221 863	226 327	198 672
		SCR	221 863	207 614	188 477	221 863	198 342	171 727
		SNCR	221 863	218 108	198 581	221 863	208 837	181 831
Bois	Résidentiel	Aucun	15 391	36 612	51 165	15 391	22 083	24 274
	Tertiaire	Aucun	330	4 657	7 119	330	4 657	7 119
	Chauffage urbain	Aucun	402	8 264	10 694	402	8 264	10 694
		SCR	402	1 653	2 139	402	1 653	2 139
		SNCR	402	4 132	5 347	402	4 132	5 347
	Industrie	Aucun	6 829	26 718	22 987	6 829	26 718	22 987
		SCR	6 829	5 344	4 597	6 829	5 344	4 597
		SNCR	6 829	13 359	11 494	6 829	13 359	11 494
	Total	Aucun	22 952	76 250	91 965	22 952	61 721	65 075
		SCR	22 952	48 265	65 020	22 952	33 736	38 129
		SNCR	22 952	58 760	75 124	22 952	44 230	48 234

Tableau 37 : Surcoûts annuels d'investissement des systèmes de dépollution en 2020-2050 (millions d'euros)

Secteur	Système de-NOx	2005	2020	2050
Chauffage urbain	SNCR	0	12,4	16,0
	SCR	0	66,1	85,6
Industrie	SNCR	0	40,1	34,5
	SCR	0	213,7	183,9
Total	SNCR	0	52,5	50,5
	SCR	0	279,8	269,5

5 Conclusion

Au regard des résultats de l'étude, les conclusions principales pouvant être données sont les suivantes :

- L'utilisation de la biomasse énergie permet de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre dues à la combustion dans les secteurs du résidentiel, du tertiaire, de l'industrie et du chauffage urbain. Cependant, l'atteinte des objectifs fixés en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre dépend aussi pour une très large part de la capacité à réduire fortement les consommations énergétiques (toutes énergies confondues).
- La rénovation du parc d'appareils domestiques utilisant la biomasse doit continuer et être encouragée car elle permet de réduire significativement les émissions de polluants atmosphériques induites par les consommations de bois énergie. Il est nécessaire d'inciter les développements d'appareils très performants et également de mener des actions d'information des utilisateurs qui emploient encore trop souvent leurs équipements dans des conditions non optimales génératrices de polluants et peuvent même dans certains cas brûler des déchets divers.
- Le développement ambitieux de la biomasse énergie dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel est pleinement compatible avec les objectifs de réduction des émissions de polluants atmosphériques. Hormis les NOx pour lesquels un développement des systèmes de traitement doit être favorisé dans les années à venir pour les grosses chaufferies, les résultats font état d'un important potentiel de réduction d'émissions sur la période 2005-2020, notamment en ce qui concerne les COVNM (-58%), les HAP ou les particules fines (-45% à -49%). Ces estimations s'appuient sur une consommation de bois maîtrisée, basée sur une demande en chauffage qui diminue en raison de l'amélioration de l'isolation des bâtiments prévue par le Grenelle de l'environnement, tout en augmentant de 3 millions le nombre de logements chauffés au bois. La réhabilitation thermique volontariste du bâti constitue donc l'une des conditions essentielles à un développement de la biomasse énergie respectueux de la qualité de l'air.
- La problématique des émissions de NOx reste à surveiller attentivement et à contrôler, même si la biomasse ne représente en 2005 que 2% des émissions nationales. Non seulement la France ne respecte pas certaines concentrations limites dans l'environnement mais de plus elle a beaucoup de difficultés en ce qui concerne le respect de son plafond d'émissions de NOx (que ce soit celui de 2010 ou celui en préparation pour 2020). La rénovation du parc d'appareils domestiques conduit à des émissions de NOx supérieures par rapport à la situation existante. Le bois étant plus émetteur de NOx que les combustibles fossiles de type gaz naturel et fioul, la mise en place de de-NOx sur des installations de puissances importantes pourrait être étudiée au cas par cas afin de limiter les émissions de NOx. Selon les scénarios considérés, le surcoût annuel d'investissement pour équiper toutes les nouvelles chaufferies biomasse de système de traitement des NOx est évalué entre 52 millions d'euros (système non catalytique ou SNCR, permettant une réduction de 2 à 6% des émissions entre 2005 et 2020) et 280 millions d'euros (système catalytique ou SCR, permettant une réduction de 6 à 11% des émissions entre 2005 et 2020).