

Consommation énergétique du traitement intensif des eaux usées en France : état des lieux et facteurs de variation

RAPPORT FINAL



DECEMBRE 2017

STRICKER Anne-Emmanuelle
HUSSON Alain
CANLER Jean-Pierre

Irstea centre de Bordeaux
50, avenue de Verdun
33612 Cestas cedex

Sommaire

NOMENCLATURE	3
REMERCIEMENTS.....	6
RESUME.....	7
INTRODUCTION	8
CHAPITRE 1. CONSOMMATION ENERGETIQUE GLOBALE D'UNE STATION	11
1.1 PERIMETRE DE L'ETUDE.....	12
1.1.1 <i>Consommations énergétiques globales</i>	<i>12</i>
1.1.2 <i>Inventaire des stations retenues pour l'étude</i>	<i>14</i>
1.2 CONSTRUCTION DE BASES DE DONNEES	15
1.2.1 <i>Constitution d'un échantillon d'étude français</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Données bibliographiques.....</i>	<i>18</i>
1.3 CARACTERISTIQUES DE L'ECHANTILLON D'ETUDE	18
1.3.1 <i>Représentativité de l'échantillon par rapport au parc à étudier.....</i>	<i>18</i>
1.3.2 <i>Description de l'échantillon à étudier</i>	<i>19</i>
1.4 ETAT DES LIEUX DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE EN FRANCE	22
1.4.1 <i>Méthodologie.....</i>	<i>22</i>
1.4.2 <i>Consommations énergétiques par procédé secondaire</i>	<i>24</i>
1.4.3 <i>Explications des variations et prédiction des consommations énergétiques par procédé secondaire</i>	<i>25</i>
1.5 POSITIONNEMENT DE LA FRANCE PAR RAPPORT A L'ETRANGER - CAS DES CULTURES LIBRES.....	39
1.5.1 <i>Comparaison des consommations spécifiques en France et à l'étranger</i>	<i>39</i>
1.5.2 <i>Explication des écarts de consommation spécifique entre la France et l'étranger</i>	<i>41</i>
CHAPITRE 2. CONSOMMATION ENERGETIQUE PAR POSTES FONCTIONNELS	43
2.1 METHODOLOGIE	45
2.1.1 <i>Définition des postes et sous-postes.....</i>	<i>45</i>
2.1.2 <i>Calcul de la consommation pas postes</i>	<i>46</i>
2.2 PUISSANCES SPECIFIQUES INSTALLEES.....	50
2.3 CONSOMMATION ABSOLUE PAR POSTE ET FACTEUR DE VARIATION INTRASITE.....	51
2.3.1 <i>Variations temporelles.....</i>	<i>51</i>
2.3.2 <i>Corrélation avec les variables de fonctionnement.....</i>	<i>51</i>
2.4 CONSOMMATION RELATIVE PAR POSTE ET FACTEURS DE VARIATION	53
2.5 CONSOMMATION SPECIFIQUE PAR POSTE ET COMPARAISON AUX VALEURS DE REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES ..	56
CHAPITRE 3. APPLICATIONS AUX STATIONS D'EPURATION EXISTANTES	59
3.1 DEMARCHE D'AUDIT ENERGETIQUE D'UNE INSTALLATION EXISTANTE	60
3.1.1 <i>Détermination de la marge d'optimisation</i>	<i>60</i>
3.1.2 <i>Identification des pistes de gain</i>	<i>63</i>
3.2 RECOMMANDATIONS AUX ACTEURS DE L'ASSAINISSEMENT EN FRANCE	63
3.2.1 <i>Introduire le critère « consommation énergétique » dans les performances de la station .</i>	<i>64</i>
3.2.2 <i>Lutte contre le surdimensionnement</i>	<i>65</i>
3.2.3 <i>Adaptation à la sous-charge.....</i>	<i>66</i>
3.2.4 <i>Lutte contre la dilution des eaux usées.....</i>	<i>66</i>
3.2.5 <i>Choix des procédés et des technologies.....</i>	<i>67</i>

3.2.6	<i>Choix des équipements</i>	67
3.2.7	<i>Automatisation</i>	67
3.2.8	<i>Optimisation hydraulique et hydrodynamique</i>	68
3.2.9	<i>Maintenance des moteurs et des équipements</i>	68
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	69
	LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	73
	LISTE DES ANNEXES	77

Nomenclature

Abréviations

Notation	Définition
AERMC	Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse
AP	Arrêté préfectoral d'autorisation
BA	Boues activées ou Bassin d'aération
BF	Biofiltre
BRM	Bioréacteur à membranes
C	Carbone (matière organique exprimée en DCO ou DBO ₅)
CCTP	Cahier des clauses techniques particulières
DERU	Directive Eaux Résiduaires Urbaines (Directive 91/271/CEE du Conseil du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines)
ECP	Eaux claires parasites
EH	Equivalent-habitant (rejet spécifique de 60 gDBO ₅ /j)
ETP	Equivalent temps plein
exp	fonction exponentielle
GES	Gaz à effet de serre
hab	Habitant (personne physique)
HQE	Haute qualité environnementale (démarche et certification appliquée en architecture)
IC95	Intervalle de confiance à 95 % (généralement appliqué à une moyenne)
IP95	Intervalle de prédiction à 95 % (appliqué à une valeur prédite par modélisation pour un individu donné)
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
MAS	Manuel d'autosurveillance
MB	Matière brute
MBBR	Moving bed biofilm reactor (Lit fluidisé sur supports plastiques mobiles)
mCE	Mètre de colonne d'eau (unité de HMT)
MdC	Matières de curage
MdV	Matières de vidange
MEDDE	Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
MO	Matière organique
MS	Matière sèche
N	Azote
NEX	Notice d'exploitation
P	Phosphore
PID	Piping and instrumentation diagram (schéma procédé)
RAD	Rapport annuel du délégataire
RPQS	Rapport annuel sur le prix et la qualité du service
SBR	Sequencing Batch Reactor (Réacteur biologique séquentiel)
SDEA	Syndicat des eaux et de l'assainissement Alsace-Moselle
SIE	Système d'information sur l'eau
STEP	Station d'épuration
TP	Temps de pluie
TS	Temps sec
X	Variable explicative
Y	Variable à expliquer

Notations

Notation	Définition	Unité
f	Fréquence	Hz
FP	Facteur de puissance	-
HMT	Hauteur manométrique totale	mCE
I	Intensité	A
n	Nombre ou effectif	-
P	Puissance	W ou kW
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	kWh/kg ou kWh/m ³
Q	Débit journalier	m ³ /j
R ² a	Coefficient de détermination ajusté (corrigé pour le nombre de termes du modèle)	-
r _s	Coefficient de corrélation de Spearman	-
TDM	Temps de marche journalier	h/j
U	Tension composée	V
V	Volume ou tension simple	m ³ ou V
η	rendement	- ou %
φ	angle de déphasage entre U et I	° ou rad
ε	Résidu (écart entre valeur observée et prédite par un modèle)	celle de la variable
α _F	Facteur de transfert de l'oxygène en conditions réelles (K _{La,boues} /K _{La,eau claire}) intégrant à la fois les caractéristiques du milieu et le colmatage / vieillissement des diffuseurs	-
α _r	Risque de première espèce	- ou %
β _r	Risque de deuxième espèce	- ou %
σ	Ecart type	celle de la variable

Indices

Notation	Définition
a	absorbée ou active (puissance)
app	apparente (puissance)
élm	éliminée (charge)
évp	évaporée (eau)
i ou j	entier compris entre 1 et n
m	mesuré
n	nominal
obs	observation ou observé
préd	prédiction ou crédit
r	réel
reac	réactive (puissance)
tot	total
u	utile (puissance)
v	vendeur (= fournisseur) d'équipement

Remerciements

Cette étude a été financée par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC), et par l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea), en charge de sa réalisation. Les agents Irstea autres que les auteurs du rapport ayant contribué au projet sont vivement remerciés.

Un comité de pilotage composé de représentants des financeurs et de l'opérateur de l'étude, ainsi que d'exploitants et de constructeurs de stations de traitement des eaux usées, a contribué aux orientations méthodologiques, à l'organisation de la collecte des données, et à la relecture du rapport. Ses membres sont remerciés pour leur investissement personnel et pour la coordination de la participation de leurs organisations respectives à l'étude.

Les responsables de station et de secteurs des trois groupes (Saur, Suez et Veolia) qui ont préparé et partagé des données, et pour certains accueilli les équipes d'Irstea sur site, sont chaleureusement remerciés pour leur investissement, leur disponibilité, et les échanges avec Irstea.

Le Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle (SDEA), a également largement contribué à l'étude. Il a mis à disposition les données de l'ensemble de son parc pour alimenter la base de données, co-financé le diagnostic énergétique approfondi de deux sites, ce qui a permis d'affiner la méthodologie, et participé à la relecture du rapport.

Enfin, tous les autres maîtres d'ouvrage et exploitants privés et publics qui ont mis à disposition leurs rapports annuels sur l'assainissement sur sollicitation de l'AERMC, et parfois des informations complémentaires à la demande d'Irstea, sont vivement remerciés pour leur collaboration.

Résumé

Ce document présente d'une part un état des lieux de la consommation énergétique des 5 principales filières de traitement intensif des eaux usées urbaines implantées en France (cultures libres : BA, SBR, BRM, et cultures fixées : BF, MBBR). Cette analyse est complétée par une comparaison avec la situation observée à l'étranger pour les 3 procédés à culture libre.

Il propose d'autre part une méthodologie de diagnostic énergétique d'une station donnée, sur son périmètre global puis sur celui des postes fonctionnels. La méthode comprend une procédure complète pour le calcul des indicateurs de consommation, ainsi qu'un cadre de référence pour évaluer les résultats obtenus en tenant compte des caractéristiques propres de la station.

Ce document ne traite cependant pas de la démarche d'optimisation énergétique qui pourrait suivre l'étape de diagnostic. Il s'achève par une synthèse, des perspectives pour poursuivre le développement des connaissances et de la démarche, et des recommandations à l'usage des acteurs du traitement des eaux usées en France.

Introduction

Les stations d'épuration (STEP) urbaines sont conçues pour traiter les rejets liquides des collectivités avant leur restitution au milieu naturel. A quelques exceptions près, les performances épuratoires du parc de stations français atteignent et souvent dépassent les exigences de traitement européennes et locales, mais au prix d'une consommation d'énergie et de réactifs et d'une production de déchets solides qui pèsent à la fois sur les **coûts d'exploitation** et sur les **émissions de gaz à effet de serre (GES)**. Selon l'ASTEE et l'ADEME (2013), les services publics d'eau et d'assainissement sont certes des contributeurs négligeables aux émissions de GES à l'échelle nationale (moins de 1 %, contre 27 % pour les transports par exemple). Toutefois, la démarche nationale de transition énergétique (loi n° 2015-992 du 17 août 2015) qui vise à diviser d'ici 2050 la consommation énergétique finale par 2 (par rapport à 2012) et les émissions de GES par 4 (par rapport à 1990) concerne l'ensemble des acteurs, quels que soient leur taille et le volume de leurs émissions. De plus, les émissions des services d'eau et d'assainissement peuvent devenir significatives à l'échelle des services d'une collectivité locale, de l'ordre de 20 % selon Luneau (2011) ou Lagarrigue (2015). Or les collectivités de plus de 50 000 habitants ont l'obligation d'élaborer un bilan de leurs émissions et un plan d'action (Plan Climat -Energie Territorial de la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010, dite Grenelle II).

L'**augmentation des coûts de l'énergie** (électrique en particulier) et les **obligations réglementaires** de réduction des émissions pour contenir le changement climatique exercent donc une pression croissante sur les collectivités pour **quantifier** puis **réduire** la consommation énergétique de leurs services d'eau et d'assainissement. Ces efforts concernent aussi bien le parc existant que les installations en projet. Des objectifs de performance énergétique et de production d'énergie sur site commencent en effet à apparaître dans les cahiers des charges des marchés.

L'objet de l'étude est restreint à la consommation énergétique, qui ne représente qu'une partie des coûts économiques et environnementaux du traitement des eaux usées urbaines. Toutefois, les nouvelles connaissances et les outils qui en sont issus pourront servir à préciser le facteur "énergie" dans les analyses économiques ou environnementales plus globales et multi-factorielles (type Analyse du Cycle de Vie).

Cette étude concerne le **traitement intensif** en se limitant aux **5 principales filières** implantées en France :

- Cultures libres : boues activées (BA), réacteurs biologiques séquentiels (SBR) et bioréacteurs à membranes (BRM) ;
- Cultures fixées : biofiltres (BF) et lits fluidisés sur supports plastiques mobiles (MBBR).

L'étude se concentre sur les deux premières étapes, incontournables mais non triviales, de toute démarche d'optimisation énergétique : la quantification et l'évaluation de la consommation. **La quantification** soulève des questions de définition et de méthode : quel périmètre et quelle durée considérer, quelles données collecter, quel niveau de résolution spatial et temporel adopter, quels indicateurs calculer..? **L'évaluation** consiste à interpréter les résultats et à les comparer à des références. Or les valeurs déjà disponibles, issues de l'exploitation courante ou d'expertises ponctuelles, sont actuellement source de controverse entre les acteurs du secteur. En effet, les consommations spécifiques observées peuvent varier considérablement d'un site à l'autre pour des filières de traitement similaires, ou différer significativement entre le terrain, les garanties du constructeur, et les références couramment retenues par la profession. Un premier défi consiste donc à identifier et hiérarchiser les facteurs de variation de la consommation énergétique parmi les caractéristiques de conception (capacité nominale, filières de traitement, niveaux de traitement, variation de charge...) et de fonctionnement des stations (caractéristiques des eaux usées, taux de charge, facteurs géographiques, ...)

Les objectifs principaux de l'étude sont de proposer une méthodologie de quantification de la consommation énergétique spécifique ainsi qu'un cadre de référence pour évaluer les résultats à **deux échelles** :

1. consommation globale, sur le périmètre de la station entière (chapitre 1) ;
2. consommation par postes fonctionnels (chapitre 2).

Pour cela, une base de données comprenant les consommations spécifiques observées, ainsi que des variables caractérisant la conception et le fonctionnement de chaque installation a été construite et analysée. Elle rassemble des données fournies par les exploitants impliqués dans le projet (33 sites exploitables), et des données extraites de rapports annuels des services d'assainissement collectés par Irstea et AERMC (277 sites exploitables). Une étude statistique a été réalisée. Une étude poussée par (sous)poste a également été menée sur 8 sites, nombre insuffisant pour avoir des valeurs de référence précises mais qui permet d'illustrer l'approche retenue.

Les résultats de ces analyses permettent de dégager des prescriptions et recommandations qui sont développées au chapitre 3.

Chapitre 1.

Consommation énergétique globale d'une station

Des données issues de plusieurs centaines de stations d'épuration françaises et étrangères ont été collectées puis analysées à l'aide d'une démarche statistique afin de caractériser leurs consommations énergétiques et d'en dégager les facteurs explicatifs. Une analyse spécifique pour 5 procédés (boues activées, réacteur biologique séquentiel, bioréacteur à membranes, biofiltre, lit fluidisé sur supports plastiques) a été menée.

1.1 Périmètre de l'étude

1.1.1 Consommations énergétiques globales

Cette étude considère l'énergie consommée / achetée sous toutes les formes, c'est à dire électrique mais également combustible (gaz ou liquide : gaz naturel, fuel, ...). Ainsi, les éventuelles valorisations énergétiques réalisées dans le périmètre de la station ne sont pas comptabilisées (exemple : utilisation du biogaz produit par méthanisation). La somme de ces différentes formes d'énergie est appelée **énergie totale**.

La **consommation globale** correspond à l'énergie totale **achetée** pour couvrir les besoins sur le **périmètre de la station entière** (traitement de l'eau, des boues, des matières extérieures liées à l'assainissement (graisses, vidange de fosses, curage de réseau, ...), et bâtiments associés). Cependant la consommation des éventuels bâtiments situés dans l'enceinte de la station mais hébergeant des activités sans rapport direct avec son fonctionnement (exemples : siège de structure intercommunale, centre d'exploitation régional,...) doit être considérée hors périmètre. Il en est de même pour le traitement des boues par co-compostage ou co-incinération sur site, car il englobe le traitement de déchets extérieurs non issus de l'assainissement (déchets verts, déchets urbains,...). En pratique, la déduction de la consommation des installations non dédiées à l'assainissement est conditionnée à l'existence d'un comptage d'énergie dédié. Dans le cas contraire, ces stations n'ont pas été considérées dans l'étude.

L'énergie éventuellement produite sur site (biogaz, hydraulique...) n'est pas considérée dans les calculs : si elle est valorisée sur site, elle vient automatiquement réduire la quantité d'énergie achetée et donc la consommation globale considérée. Si elle est revendue hors site, elle n'a pas d'impact sur la consommation de la station.

1.1.1.1 Consommation absolue

La consommation absolue est la quantité d'énergie consommée rapportée à la durée considérée. Elle est exprimée en kWh/an ou kWh/j.

Comme les charges hydrauliques et organiques, la consommation d'énergie absolue subit des variations à l'échelle horaire, journalière, hebdomadaire, saisonnière, et annuelle. Les données à analyser doivent donc couvrir une période suffisamment longue pour être représentative : une année semble un minimum pour intégrer les effets cycliques jusqu'à

l'échelle saisonnière. Le pas de temps d'analyse des données peut être journalier, mensuel ou annuel, suivant les données disponibles et les objectifs.

Les consommations absolues sont notées dans la suite du document Ytot.

Détermination de la consommation de combustible

La consommation de combustible est mesurée en masse ou en volume. Pour une livraison par un réseau de distribution (gaz naturel), le fournisseur effectue un comptage par débitmétrie en continu, comme pour l'électricité. Pour les autres combustibles, qui sont livrés par camion et stockés sur site, la mesure du fournisseur est discontinue et la fréquence irrégulière. Le suivi en continu de la consommation n'est assuré que si la station est équipée de son propre débitmètre, qui doit être enregistré en supervision et/ou relevé régulièrement par l'exploitant. Le suivi du stock doit également être effectué.

La consommation validée doit ensuite être convertie en kWh. Dans cette étude on a utilisé le pouvoir calorifique inférieur (PCI). Le Tableau 1 donne le PCI des principaux combustibles utilisés par les stations. On notera que le PCI peut varier légèrement selon les sources, en particulier pour les combustibles dont la composition dépend de l'origine géographique et du raffinage. Aussi, il est toujours préférable d'utiliser la masse volumique et le PCI indiqués par le fournisseur du combustible.

Tableau 1. PCI des principaux combustibles utilisés pour le traitement des eaux usées dans les conditions normales (0°C, 1013,25 hPa)

Combustible	Etat	Masse volumique kg/Nm3	PCI massique kWh/kg	PCI volumique kWh/Nm3
Méthane	gaz	0.72	13.9	10.0
Biogaz (65% CH4 v/v)	gaz	1.16	5.6	6.5
Gaz naturel H	gaz	0.82	12.5	10.3
Gaz naturel B	gaz	0.83	10.8	9.0
Propane commercial	gaz	2.04	12.8	26.1
Butane commercial	gaz	2.65	12.7	33.5
Gazole (diesel)	liquide	840	11.8	9 940
Fioul lourd	liquide	1 000	11.2	11 160

1.1.1.2 Consommation spécifique

La consommation spécifique est le rapport entre l'énergie totale consommée et l'unité fonctionnelle (masse, volume, ...) traitée sur le même périmètre et la même durée.

Sur le périmètre de la station, trois consommations spécifiques ont été définies :

- Consommation par kg DBO₅ éliminée (entrée – sortie) (Ytot_DBO) ;
- Consommation par kg DCO éliminée (entrée – sortie) (Ytot_DCO) ;
- Consommation par m³ traité (Ytot_V).

La DBO₅ et la DCO paraissent redondantes, mais elles sont en réalité complémentaires. La DBO₅ est l'unité de référence pour les aspects réglementaires, elle est donc

systématiquement indiquée et largement employée. Cependant la DCO bénéficie d'une fréquence et d'une fiabilité d'analyse supérieure, et paraît donc plus appropriée pour caractériser la charge organique.

Pour éviter de mélanger les unités, la base de données que nous avons créée a été séparée en deux référentiels, un où les charges organiques sont exprimées en DBO₅ et un autre où c'est la DCO. Les consommations spécifiques seront analysées dans les deux référentiels, dans le but de déterminer quelle unité paraît la plus adaptée (Tableau 2. Application des référentiels de charge organique).

Tableau 2. Application des référentiels de charge organique

		Référentiel	
		DCO	DBO5
Ytot	kWh/j	X	X
Ytot_DCO	kWh/kg DCO élm	X	
Ytot_DBO	kWh/kg DBO5 élm		X
Ytot_V	kWh/m3	X	X

Pour rester cohérent avec l'objet de l'étude, on ne considère que les flux effectivement traités jusqu'à un niveau secondaire ou plus. Les éventuelles surverses survenues entre le point de mesure d'entrée et l'étage biologique (by-pass après prétraitements ou décantation primaire) doivent donc être déduites des flux en entrée et en sortie de l'installation.

1.1.2 Inventaire des stations retenues pour l'étude

Le parc des stations d'épuration que l'on souhaite étudier possède les caractéristiques suivantes :

- La **capacité nominale** est supérieure ou égale à 2 000 EH. Cette limite a été fixée afin de disposer d'une fréquence minimale d'échantillonnage de 12/an pour caractériser les charges organiques traitées.
- La **filière eau** assure un niveau de traitement secondaire ou plus. L'étage biologique repose sur l'un des cinq procédés de traitement intensif listés dans le Tableau 3. Les stations hybrides combinant plusieurs procédés secondaires en série ou en parallèle sont exclues.

Tableau 3. Liste des procédés secondaires à étudier

		Culture	
		Libre	Fixée
Boue activée	BA	X	
Réacteur biologique séquentiel	SBR	X	
Bioréacteur à membranes	BRM	X	
Biofiltre	BF		X
Lit fluidisé sur supports plastiques mobiles	MBBR		X

- Toutes les **filières boues** sont considérées, de l'absence de traitement (cas des boues extraites évacuées vers une autre station) jusqu'à l'incinération sur site. Toutefois, le co-traitement avec des déchets extérieurs non issus de l'assainissement est exclu. Par contre, le traitement de boues extérieures est accepté, puisqu'il s'agit de sous-produits d'assainissement et que cette pratique est assez fréquente. Leur impact sur la consommation d'énergie globale d'une installation est généralement peu sensible.
- Les stations qualifiées **d'économies en énergie ou neutres en carbone** sont également exclues de l'étude. L'objectif de l'étude est l'analyse du parc existant, tandis que ces stations appartiennent à une population émergente de conception différente.
- Les données récoltées correspondent à une période de fonctionnement "normal" (absence d'événement exceptionnel, de travaux perturbants, ...). La station doit être jugée "conforme en performance" par rapport aux exigences de traitement européennes et locales.

Au total, un parc d'environ 3 850 stations répondant aux critères a été inventorié en France.

1.2 Construction de bases de données

Deux bases de données rassemblant les consommations globales et spécifiques (échantillon français et bibliographie internationale) ainsi que des informations sur la conception et le fonctionnement des stations ont été construites et analysées. Les données de la base française respectent les définitions et les objectifs de qualité décrits dans le paragraphe 1.1.2. Les données de la base bibliographique sont nettement moins bien décrites étant donné la diversité de leurs sources.

1.2.1 Constitution d'un échantillon d'étude français

1.2.1.1 Sources de données

L'échantillon collecté comprend 318 observations réalisées au pas de temps annuel sur 310 installations. Elles proviennent principalement des rapports annuels des services d'assainissement:

- Le rapport sur le prix et la qualité du service (RPQS), produit par la collectivité sous forme d'indicateurs de performance à destination des usagers. Il est public.

- Le rapport annuel du délégataire (RAD), produit par la société exploitante en cas de délégation de service public. Il est destiné à la collectivité et n'est pas public.

L'intérêt de ces rapports pour notre étude est d'y trouver un minimum d'informations descriptives sur la station ainsi que des éléments de fonctionnement résumés au moins au niveau annuel (charges reçues, qualité du rejet, boues produites et évacuées,...). La consommation d'énergie ne fait pas partie des indicateurs obligatoires des RPQS, mais elle y est fréquemment reportée.

En complément, 33 stations mises à disposition par les exploitants directement impliqués dans l'étude ont été intégrées à l'échantillon. Les données fournies pour ces sites vont en général bien au-delà des rapports annuels.

1.2.1.2 Description des variables

Les variables disponibles pour l'échantillon français sont listées de manière complète en Annexe 1. Il convient toutefois de préciser quelques définitions.

La **température de l'air** est une valeur moyenne calculée par modélisation par le site climate-data.org pour chaque commune d'implantation d'après les relevés météorologiques disponibles sur la période 1982 – 2012. Cette valeur est donc un indicateur climatique qui caractérise le lieu d'observation. Une température caractérisant l'année d'observation aurait probablement constitué une variable plus pertinente (indicateur météorologique plutôt que climatique), mais elle n'est pas disponible gratuitement pour chaque commune.

Les **concentrations** des eaux usées sont les moyennes annuelles des résultats d'analyse obtenus sur l'ensemble des échantillons d'autosurveillance. A défaut, elles ont été calculées en divisant la charge moyenne par le débit moyen. Les **ratios de concentrations** ont été calculés à partir des concentrations ou des charges moyennes.

La **capacité nominale**, qu'elle soit organique ou hydraulique, n'a pas une définition unique. Dans cette étude nous avons souhaité retenir des charges journalières qui soient les plus représentatives possibles de la démarche de dimensionnement, tout en ne retenant qu'une seule valeur par variable :

- Dans le cas des stations conçues pour répondre à une variation de charge saisonnière (d'origine touristique ou industrielle), nous avons retenu les charges moyennes journalières de la saison de pointe.
- Dans le cas de stations qui distinguent une charge nominale de temps sec (TS) et de temps de pluie (TP), nous avons calculé une charge moyenne hebdomadaire ou annuelle pondérée par le nombre de jours de temps sec et de temps de pluie considérés dans le dimensionnement s'il était disponible, ou un ratio par défaut de 5 jTS et 2 jTP par semaine sinon.

Cette démarche a été appliquée à la fois pour les charges organiques exprimées en DCO et DBO₅, et pour le débit. Ces charges ont ensuite servi à définir la capacité nominale en EH et à calculer les taux de charge organique et hydraulique.

La date de **mise en service** retenue est celle associée à la capacité effective lors de l'étude : elle peut donc correspondre à une extension de la station plutôt qu'à la construction d'origine. **L'âge** de la station correspond à la différence entre l'année de l'observation et l'année de la mise en service.

Les **rendements** de la filière eau ont été calculés à partir des concentrations moyennes des eaux usées définies ci-dessus et des moyennes annuelles des concentrations du rejet traité jusqu'à un niveau secondaire ou plus.

La **siccité** est la moyenne annuelle des résultats d'analyse sur les boues avant chaulage. Certaines stations produisent deux ou trois qualités différentes de boues au cours de l'année, pour s'adapter à des destinations différentes ou à des épisodes de panne ou de maintenance sur la filière boues (exemples : boues liquides / pâteuses / séchées). Dans ce cas, la siccité moyenne a été calculée en pondérant les siccités moyennes de chaque qualité de boues par leurs masses. A défaut, la siccité moyenne a été calculée à partir des masses de matière sèche et de matière brute évacuées, en déduisant les éventuels ajouts de chaux.

La définition des **niveaux de traitement** est issue d'une interprétation simplifiée des règlements européens et français sur la base du traitement de l'azote et du phosphore (Tableau 4).

Tableau 4. Définition des modalités pour le niveau de traitement

Niveau	Paramètre	Concentration			Rendement
C	NTK	> 10	mgN/L	et	< 80%
CN	NTK	≤ 10	mgN/L	ou	≥ 80%
CNDN	NGL	≤ 15	mgN/L	ou	≥ 70%
P	PT	≤ 2	mgP/L	ou	≥ 80%

On définira deux niveaux de traitement : le niveau de traitement **requis** correspond à celui de l'arrêté préfectoral en vigueur au moment de l'observation. Le niveau de traitement **réel** correspond à la qualité effective du traitement sur la base des concentrations moyennes annuelles mesurées et des rendements calculés selon les définitions ci-dessus. Le niveau réel n'est malheureusement pas toujours identifiable, car les rapports annuels se limitent souvent aux paramètres de l'arrêté. L'omission du phosphore étant trop fréquente dans les rapports annuels, on a décidé de limiter le niveau de traitement réel à l'information sur l'azote. Par exemple, le niveau CN(P) indique une nitrification poussée, avec un éventuel traitement poussé du phosphore, confirmé ou non. Lorsque les concentrations en P étaient indiquées en entrée et en sortie, les performances réelles de traitement du phosphore figurent toutefois dans la base sous forme quantitative. Dans les cas plus rares où l'azote était omis dans les rapports annuels, on a sollicité le maître d'ouvrage ou l'Agence de l'Eau pour obtenir les données complètes d'autosurveillance. En cas d'échec, le niveau de traitement réel reste inconnu.

Les technologies de la filière de traitement de l'eau sont décrites à l'aide de 5 variables allant de l'étage **Primaire** à **Tertiaire**. Les variables « **Secondaire 1** » et « **Secondaire 2** » apportent des précisions sur l'étage biologique. Leurs modalités dépendent donc de celle prise par la variable « **Secondaire** » comme cela est explicité en Annexe 1. Par exemple, les procédés BA sont associés à une variable décrivant la technologie d'aération, les procédés BRM par deux variables concernant le type de membrane utilisée et la configuration de l'étage de filtration (intégré / séparé).

1.2.2 Données bibliographiques

Une revue bibliographique a été menée afin de pouvoir comparer les consommations énergétiques des stations françaises et étrangères. Les sources exploitées sont recensées dans la Liste des références bibliographiques figurant en fin de rapport. Les recherches étaient ciblées sur les 5 procédés de traitement intensif à étudier, mais sans imposer d'autres critères de sélection afin de maximiser le nombre d'observations. Les publications sur la consommation d'énergie des cultures fixées étant trop rares, la base de données bibliographique a finalement été restreinte aux 3 procédés à culture libre (BA, BRM et SBR).

Elle a été construite sur un modèle inspiré de la base française et simplifié pour s'adapter à l'information disponible dans la bibliographie. Elle ne comprend que 17 variables et leur qualité est bien inférieure à celle atteinte dans la base française du fait de l'hétérogénéité des sources. Ainsi le taux de valeurs manquantes est beaucoup plus élevé et la définition des grandeurs rapportées est moins homogène.

Une publication peut contenir une ou plusieurs observations exploitables. Elle peut représenter un site unique, ou un ensemble de sites lorsque la publication porte sur un échantillon de stations et n'en rapporte que des valeurs synthétiques. Le Tableau 5 dresse le bilan des données collectées.

Tableau 5. Nombre de données bibliographiques collectées par procédé

	Publications	Observations	Sites
BA	31	131	899
SBR	9	33	135
BRM	19	49	84
Total	59	213	1 118

1.3 Caractéristiques de l'échantillon d'étude français

1.3.1 Représentativité de l'échantillon par rapport au parc à étudier

Les effectifs de l'échantillon sont présentés en fonction du procédé secondaire dans le Tableau 6.

Tableau 6. Effectifs et capacité nominale de l'échantillon en fonction du procédé secondaire

	Effectif	Capacité de traitement kEH
	-	
BA	183	7 387
SBR	12	693
BRM	54	1 292
BF	52	4 728
MBBR	9	420
Echantillon	310	14 520

La Figure 1 présente le rapport entre les effectifs de l'échantillon et du parc.

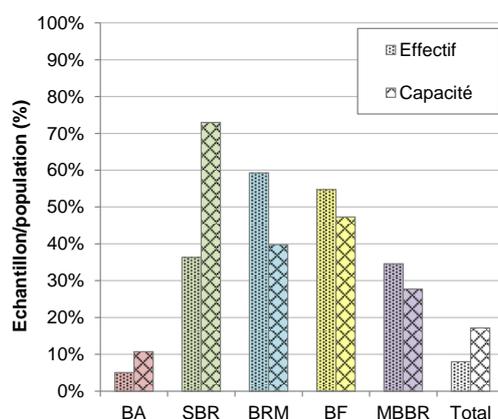


Figure 1. Part du parc à étudier représentée par l'échantillon en effectifs et en capacité

L'échantillon collecté représente 8 % des effectifs du parc à étudier. Cette proportion varie cependant fortement selon le procédé secondaire. L'échantillon ne représente qu'une faible fraction des BA du parc (parc = STEP > 2000 EH), mais il compte plus d'un tiers des SBR et MBBR du pays, et plus de la moitié des BRM et BF.

L'échantillon représente 17 % de la capacité de traitement du parc à étudier. C'est deux fois plus qu'en effectifs. On peut donc aussi suspecter que l'échantillonnage a privilégié des installations globalement plus grandes. Mais la situation est là encore contrastée selon le procédé. La représentativité de l'échantillon par rapport au parc en termes de taille semble acquise pour les BRM, les BF et les MBBR, tandis que l'échantillon des BA et des SBR présentent un biais sur la capacité (plus grande). Ces distorsions sont involontaires mais liées à la disponibilité des données, qui augmente avec la taille des installations.

1.3.2 Description de l'échantillon à étudier

1.3.2.1 Taux de charge

L'analyse des charges reçues par les installations montrent que le parc fonctionne en sous-charge modérée (50 % des stations ont un taux de charge en DBO₅ compris entre 34 % et 59 %) à extrême (25 % des stations ont un taux de charge < 34 %). Les taux de charge exprimés par rapport à la DCO et au débit sont légèrement supérieurs.

1.3.2.2 Taille

La distribution des **tailles** (Figure 2) montre que les stations < 50 kEH représentent 76 % de l'échantillon, avec un équilibre entre les petites (2 à 10 kEH) et les moyennes stations (10 à 50 kEH).

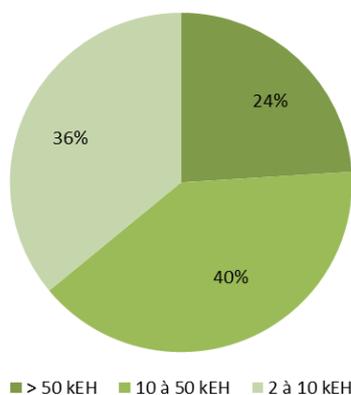


Figure 2. Répartition des tailles de station dans l'échantillon

1.3.2.3 Niveaux de traitement requis / réel

Une nitrification poussée est exigée pour 70 % des installations de l'échantillon, complétée par une dénitrification poussée dans 52 % des cas. Un traitement poussé du phosphore est exigé pour 55 % des installations (Figure 3).

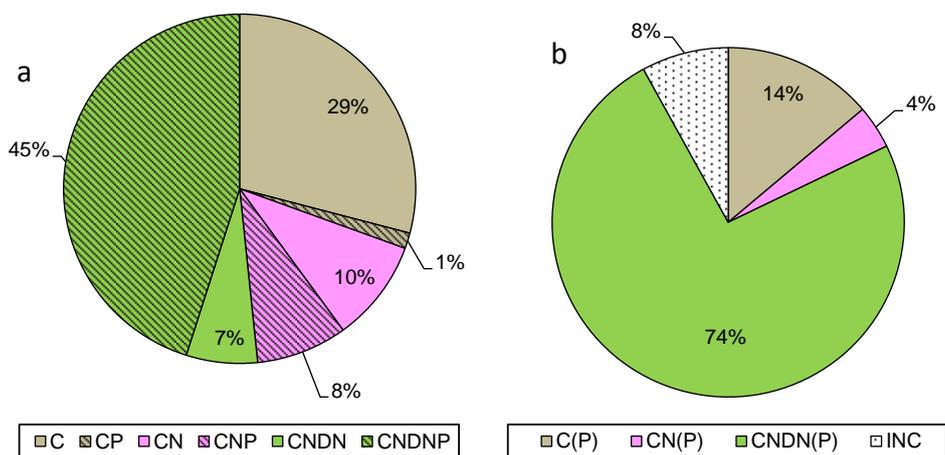


Figure 3. Répartition des niveaux de traitement requis(a) et réel (b) dans l'échantillon

Etant donné que les stations de l'échantillon sont conformes en performance, elles atteignent toutes au moins le niveau requis, et le dépassent en fait souvent : au moins $\frac{3}{4}$ des installations atteignent un niveau CNDN(P), alors qu'il n'est requis que dans la moitié des cas (cf. Figure 3). Le niveau CN(P) est rare en réalité, et concerne essentiellement les cultures fixées. En effet, les cultures libres nitrifiantes assurent généralement une dénitrification poussée, y compris pour des raisons autres que réglementaires : la dénitrification est

recherchée pour sécuriser la décantation secondaire (BA et SBR), et l'aération de l'étage biologique est séquencée pour économiser l'énergie face à la sous-charge organique, quel que soit le procédé.

1.3.2.4 Filière boues

Siccité finale des boues

La siccité est une variable généralement mal renseignée pour l'échantillon. Le **niveau de siccité** est plus informatif (Figure 4), et montre que la déshydratation est le niveau de traitement dominant.

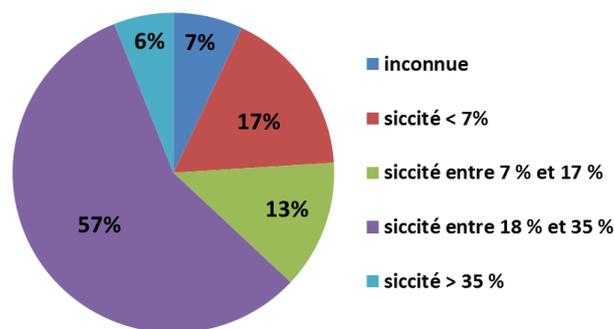


Figure 4. Répartition des niveaux de siccité dans l'échantillon

Digestion

La **digestion anaérobie** des boues ne concerne que 21 observations soit 7,6 % de l'échantillon validé. L'échantillon initial contenait aussi un cas de **stabilisation aérobie**, mais sa consommation d'énergie en fait une observation extrême qui a été exclue.

La **valorisation du biogaz** concerne 13 observations, c'est-à-dire que 62 % des installations équipées d'une digestion anaérobie dans l'échantillon valorisent au moins une partie de leur production de biogaz, principalement sous forme de chaleur. Elle est utilisée pour chauffer les digesteurs, mais parfois aussi les bâtiments ($n_{\text{obs}} = 5$), ainsi que pour le séchage thermique ($n_{\text{obs}} = 4$) ou l'incinération des boues ($n_{\text{obs}} = 2$).

1.4 Etat des lieux de la consommation énergétique en France

L'analyse est fondée exclusivement sur l'étude de l'échantillon français. L'analyse des consommations d'énergie est approfondie pour chacun des 5 procédés secondaires séparément, en allant jusqu'à la modélisation multivariée lorsque les données le permettent. Les méthodes statistiques univariées, bi-variées ou multivariées utilisées pour analyser les bases de données, sont explicitées en Annexe 2.

1.4.1 Méthodologie

1.4.1.1 Sélection des observations validées et analyse univariée

Les observations sont dites validées si la consommation énergétique est cohérente avec les variables explicatives déterminantes. Selon la Figure 5, 14 % des observations de l'échantillon ont été invalidées. Cependant, les SBR se distinguent par l'absence d'observation extrême, tandis que les BRM en comptent 25 %.

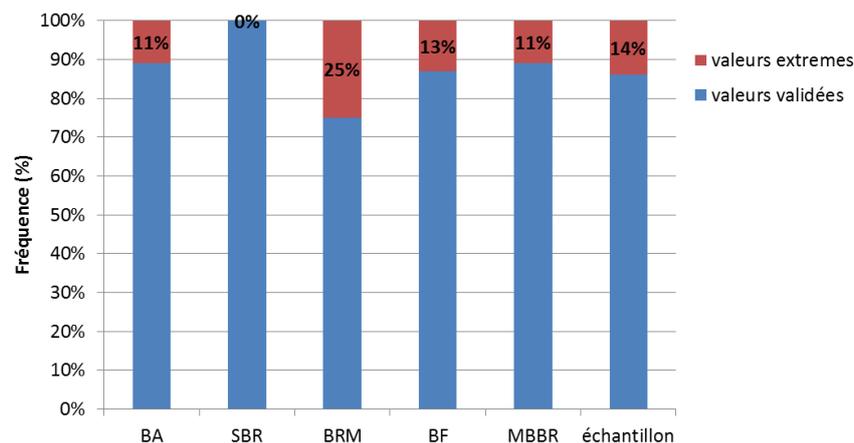


Figure 5. Proportion d'observations validées en fonction du procédé secondaire

Les résultats présentés dans la suite seront donc restreints aux 275 observations validées. Une description plus précise de l'échantillon à analyser est reportée en Annexe 4.

Une fois les observations validées, une analyse univariée a été réalisée sur chaque sous échantillon (par procédé secondaire) pour déterminer décrire et résumer chaque variable (moyennes, médianes, écarts types...).

1.4.1.2 Interdépendance des variables explicatives

De manière à limiter le nombre de variables explicatives et éviter les redondances, une analyse bivariée a été conduite pour chaque couple de variables explicatives pour déterminer les éventuels liens entre deux variables.

Un **schéma de causalité** est proposé en Figure 12 de l'Annexe 3.

1.4.1.3 Détermination des variables influençant les consommations énergétiques pour chaque procédé secondaire

Une analyse bi-variée a ensuite été appliquée à l'étude des dépendances entre la consommation d'énergie et les variables explicatives (Y – X) pour chaque procédé secondaire. Elles sont illustrées en Annexe 3 par le schéma de causalité (Figure 12). La consommation d'énergie est liée à de nombreuses variables, mais la relation n'est pas forcément directe et causale. Les connaissances techniques ainsi que l'étude préalable des relations entre variables explicatives permettent de distinguer les variables directement déterminantes sur la consommation d'énergie. On soupçonne un lien indirect entre Y et X lorsque :

- X présente un lien fort avec une des variables déterminantes identifiées (relation X-X) ;

et

- il n'y a pas d'argument technique en faveur d'une causalité de X sur Y ;

ou

- le sens de la relation observée entre Y et X va à l'encontre des connaissances techniques.

Lorsque seule l'une de ces 3 conditions est remplie, il subsiste un doute sur la nature du lien entre Y et X.

1.4.1.4 Prédiction des consommations énergétiques par l'utilisation de modèles

Pour les procédés BA, BRM et BF, une analyse multivariée est réalisée permettant de construire un modèle de prédiction des consommations énergétiques. L'analyse multivariée permet d'affiner l'identification des variables déterminantes, de les hiérarchiser, et d'obtenir un modèle explicatif et prédictif qui prenne en compte leur effet combiné.

Pour chacun des 3 procédés secondaires soumis à cette analyse (BA, BRM et BF), 6 modèles (3 variables à expliquer x 2 référentiels de variables explicatives) ont été développés ; les 18 modèles obtenus sont caractérisés par :

- leur équation : variables explicatives et coefficients associés ;
- leur qualité d'ajustement, évaluée par des approches numériques et graphiques : coefficient de détermination ajusté (R^2_a), vérification des hypothèses sur les résidus, graphique de validation représentant $Y_{\text{préd}}$ en fonction de Y_{obs} ;
- leur domaine de validité, qui définit les plages de valeurs acceptables pour les variables explicatives.

Compte tenu du faible nombre d'observations, cette analyse multivariée n'a pas été conduite pour les procédés MBBR et SBR.

Les équations des modèles ne sont pas présentées dans ce document ; elles ont été synthétisées sous forme d'une application web disponible au lien suivant : <https://energie-step.irstea.fr/>. Les paragraphes qui suivent fournissent des éléments d'interprétation relatifs aux variables explicatives retenues.

1.4.2 Consommations énergétiques par procédé secondaire

Le Tableau 7 résume les consommations spécifiques observées pour chaque procédé secondaire en France, d'après l'analyse univariée effectuée sur les échantillons validés. Une description complète des consommations est disponible en Annexe 5.

Tableau 7. Résumé des consommations globales spécifiques observées par procédé secondaire en France

			Médiane	Moyenne	Intervalle de confiance 95 %	Minimum	Maximum	nbre de valeur
Ytot_DCO (kWh/kg DCO éliminée)	Cultures libres	BA	1,31	1,39	± 0,06	0,73	2,63	157
		SBR	2,13	2,01	± 0,31	1,21	2,83	12
		BRM	2,64	2,75	± 0,19	1,65	3,90	41
	Cultures fixées	BF	1,80	1,90	± 0,22	0,78	3,72	47
		MBBR	2,77	2,92	± 0,40	2,38	3,75	8
	Ytot_DBO (kWh/kg DBO5 éliminée)	Cultures libres	BA	3,10	3,20	± 0,1	1,50	6,80
SBR			5,00	4,60	± 0,7	2,80	5,90	12
BRM			6,60	6,80	± 0,6	3,60	11,00	40
Cultures fixées		BF	4,00	4,50	± 0,6	1,60	9,60	47
		MBBR	6,40	6,50	± 1,0	4,80	8,30	8
Ytot_V (kWh/ m3)		Cultures libres	BA	0,65	0,70	± 0,04	0,29	1,69
	SBR		0,98	1,07	± 0,29	0,36	2,01	12
	BRM		1,67	1,68	± 0,11	1,11	2,49	40
	Cultures fixées	BF	0,76	0,86	± 0,13	0,24	2,15	47
		MBBR	1,50	1,58	± 0,56	0,63	2,94	8

Ces valeurs peuvent servir de référence représentative du parc français pour un procédé dans son ensemble, mais elles ne doivent en aucun cas être utilisées pour situer une installation en particulier, étant donnée leur variabilité.

Les moyennes sont assorties de leur intervalle de confiance à 95 % (IC95), qui caractérise l'incertitude. L'IC95 relatif augmente lorsque le nombre d'observations est faible (cas des SBR et MBBR) et lorsque la dispersion est élevée (cas des BF). La dispersion est illustrée graphiquement sur la Figure 6 pour Ytot_DBO.

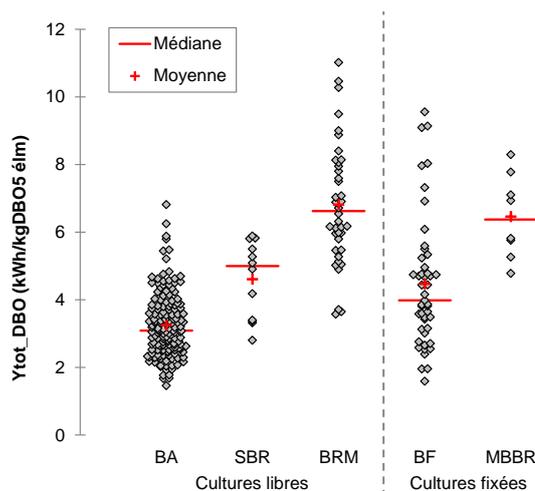


Figure 6. Diagramme de dispersion de Ytot_DBO en fonction du procédé secondaire en France

La Figure 6 met aussi en évidence les différences entre procédés. La BA apparaît comme le procédé le plus économe, tandis que le MBBR et le BRM sont les plus énergivores. Ces différences sont attribuables en partie au procédé secondaire lui-même et donc aux niveaux de rejet obtenus (facteurs intrinsèques), mais aussi aux contraintes de conception et aux conditions de fonctionnement qui caractérisent chaque procédé (facteurs externes).

1.4.3 Explications des variations et prédiction des consommations énergétiques par procédé secondaire

Pour les procédés BA, BRM et BF, une analyse multivariée a été menée et les modèles seront présentés de manière simplifiée dans le corps du texte par des tableaux regroupant l'information suivante :

- la liste des variables explicatives déterminantes ;
- le sens de leur effet sur la consommation d'énergie (croissant, décroissant, ou les deux pour les effets non monotones) ;
- une hiérarchisation du pouvoir explicatif des variables X (rang 1 pour celle ayant le plus fort effet) ;
- les indicateurs de qualité d'ajustement et de validité des modèles. Les indicateurs non satisfaisants sont indiqués en rouge.

Pour les procédés SBR et MBBR, le nombre d'observations très réduit oblige à se limiter à une analyse bi-variée exploratoire. Les résultats consisteront à présenter les quelques variables déterminantes identifiées et les graphiques bi-variés associés (Y_{obs} en fonction de X).

1.4.3.1 Boues activées (BA)

Le Tableau 8 résume les 6 modèles obtenus pour expliquer et prédire la consommation d'énergie des BA par l'analyse multivariée. Selon l'unité et le référentiel choisis, elle est déterminée par 4 à 6 variables explicatives (le rang 1 correspondant à la variable ayant l'effet le plus fort). Les graphiques illustrant l'ajustement des modèles sont présentés en Annexe 6.

Tableau 8. Variables explicatives déterminantes sur la consommation d'énergie des BA

		Référentiel DCO						Référentiel DBO5					
		Ytot		Ytot_DCO		Ytot_V		Ytot		Ytot_DBO5		Ytot_V	
		Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang
Géographie	Température air									↗	5	↗	4
Caractéristiques eaux usées	Concentration C	↘	5	↘↗	2	↗	1	↘	5	↘↗	2	↗	1
	C/MES									↗↘	6		
	C/NTK	↘	2	↘	3	↘	3	↘	2	↘	3	↘	2
	NTK/PT					↗	5						
Charge filière eau	Charge C reçue	↗	1					↗	1				
	Taux de charge C	↘	4	↘	1	↘	2	↘	3	↘	1		
Performances filière eau	Rendement NTK											↗	5
Performances filière boues	Séchage	SEC > ABS	3	SEC > ABS	4	SEC > ABS	4	SEC > ABS	4	SEC > ABS	4	SEC > ABS	3
Evaluation du modèle	Nombre d'observations utilisées	140		138		133		150		152		129	
	Nombre de variables X	5		4		5		5		6		5	
	R2 ajusté	0.979		0.538		0.742		0.980		0.558		0.757	
	Résidus distribués normalement	Non		Non		Oui		Non		Oui		Oui	
	Résidus indépendants de Y	Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui	
	Résidus indépendants de X	Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui	

Parmi les 187 observations BA initialement disponibles, seules 129 à 152 ont pu être utilisées pour développer les modèles : les autres observations ont dû être écartées soit parce qu'elles sont incomplètes (au moins l'une des variables explicatives est manquante), soit parce qu'elles apparaissent extrêmes.

Consommation absolue (Ytot)

La consommation absolue des BA est déterminée par 4 variables quantitatives et une variable qualitative.

Comme illustré sur la Figure 7, le déterminant principal est la **charge organique reçue**. Ceci suggère que l'indicateur de consommation spécifique le plus pertinent pour les BA serait Ytot_C plutôt que Ytot_V.

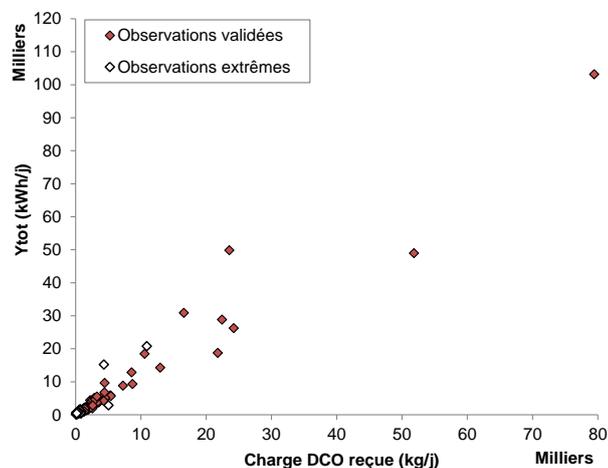


Figure 7. Consommation énergétique Y_{tot} observée sur les BA en fonction de la charge organique

Les 4 variables explicatives complémentaires de Y_{tot} sont logiquement celles qui déterminent aussi Y_{tot_C} . Pour éviter les redites, leur rôle sera commenté dans les paragraphes suivants.

Les 5 variables sélectionnées pour expliquer Y_{tot} sont identiques dans les référentiels DCO et DBO_5 . La seule petite différence est une inversion du rang entre le taux de charge et le séchage.

Consommation spécifique par rapport à la charge organique (Y_{tot_C})

Dans le référentiel DCO, Y_{tot_C} est déterminée par 3 variables quantitatives et une variable qualitative.

A l'image de ce qui est observé concernant la consommation absolue, le **taux de charge organique** est le facteur principal d'explication de la consommation spécifique.

La relation décroissante avec le **ratio DCO/NTK** de l'eau usée traduit la demande énergétique croissante pour le traitement de la charge azotée associée à une charge organique donnée. L'effet de la **concentration des eaux usées** est de type parabolique. L'inversion de sens se situe autour de 750 mg DCO/L. En deçà, la consommation d'énergie croît avec la dilution de l'eau usée, ce qui traduit l'augmentation de la consommation d'énergie pour le pompage des volumes à traiter, à charge organique constante. Au-delà de ce seuil, la consommation d'énergie augmente avec la concentration, bien que la réduction de la consommation pour le pompage se poursuive : il est possible que cela reflète une augmentation de l'aération pour compenser la diminution de l'efficacité du transfert d'oxygène (facteur α_F) dans une eau interstitielle concentrée.

Le coefficient associé à la modalité SEC (séchage) indique que la **déshydratation poussée** des boues engendre en moyenne une consommation supplémentaire de 0,41 kWh/kgDCO_{élim} sur le périmètre global de la station. La production de boue spécifique moyenne observée sur les 9 observations concernées étant de 0,46 kgMES/kgDCO_{élim}, cela reviendrait à une consommation spécifique de 900 kWh/t MS produit pour le séchage ou l'incinération des boues. Cette valeur est cohérente avec les références bibliographiques pour l'incinération (cf. Annexe 16). Elle est pertinente en moyenne, mais elle n'est pas applicable à la prédiction de la consommation d'une installation en particulier, car les 9 observations recouvrent en fait des situations très diverses.

Le nombre d'observations ($n_{obs} = 9$) est cependant trop faible pour définir des coefficients distincts selon les situations. En attendant de collecter plus de données pour affiner et différencier ce coefficient, il pourra être remplacé par une consommation spécifique recalculée à partir des valeurs de la synthèse bibliographique en tenant compte du type de technologie et des masses d'eau réellement évaporées (cf. Annexe 16).

Dans le référentiel DBO₅, le modèle Ytot_DBO fait appel à deux variables explicatives supplémentaires. La **température moyenne de l'air** apparaît avec un effet croissant. Or elle agit sur plusieurs postes de consommation énergétique :

- la régulation thermique des bâtiments : la température possède un effet décroissant pour le chauffage, qui s'inverse au-delà d'un seuil en cas de climatisation (forme parabolique);
- l'aération biologique : l'augmentation de la température de l'air a un effet négatif sur l'apport spécifique brut (kgO₂/kWh) des systèmes d'aération en réduisant la teneur volumique de l'air en oxygène (gO₂/m³), et l'augmentation de la température de la boue a un effet positif sur la demande en oxygène pour la respiration endogène. Ces deux mécanismes jouent dans le sens croissant et s'additionnent.

La résultante positive dans le modèle indique que pour une BA, l'effet croissant de la température moyenne de l'air sur la consommation énergétique de l'aération est prédominant sur celle des bâtiments sur la plage considérée (9°C – 16°C).

Le ratio **DBO₅/MES** de l'eau usée apparaît avec un effet parabolique, avec un maximum autour de 0,8 g/g. L'effet de cette variable n'est pas facilement interprétable, mais il est possible qu'elle agisse sur la consommation d'énergie globale à travers ses effets sur la production et les caractéristiques de la boue (concentration, âge) de l'étage biologique.

Consommation spécifique par rapport à la charge volumique (Ytot_V)

Dans le référentiel DCO, Ytot_V est déterminée par 4 variables quantitatives et une variable qualitative.

Le principal facteur de variation de Ytot_V est la **concentration en C** (effet croissant). Le **ratio C/N** introduit l'effet de la charge en N à traiter, en plus de la charge en C déjà introduite avec la concentration. L'effet croissant du **ratio N/P** reste difficile à interpréter. Il est possible qu'il vienne simplement renforcer l'information sur la charge en N. Il paraît également surprenant que l'analyse retienne le **taux de charge organique** plutôt qu'hydraulique pour représenter la part de la consommation d'énergie peu ou pas dépendante de la charge à traiter.

Dans le référentiel DBO₅, le taux de charge disparaît complètement de l'équation et deux nouvelles variables apparaissent, avec un effet croissant : la **température de l'air**, déjà commentée pour Ytot_DBO₅, et le **rendement d'élimination en NTK**. La sélection du rendement NTK dans l'analyse multivariée évoque un lien plutôt direct et causal, qui s'explique facilement : la nitrification représente une importante demande en oxygène qui pèse sur la consommation d'énergie de l'aération. On peut néanmoins se demander pourquoi cette variable n'intervient pas pour expliquer Ytot_V dans le référentiel DCO, ni pour expliquer Ytot_C.

Validité et qualité d'ajustement des modèles

La **qualité des modèles est globalement acceptable comme le montre l'interdépendance des résidus et les qualités d'ajustement**. Seule la qualité d'ajustement pour les modèles Ytot_C reste médiocre ($R^2 < 0,6$), indiquant que l'erreur de prédiction est élevée. Ceci suggère qu'il existe une ou plusieurs autre(s) variable(s) explicative(s) déterminante(s) sur Ytot_C, mais indisponible(s) dans la base de données. Les caractéristiques des boues (âge, concentration, charge massique...) et la gestion de l'aération sont des variables candidates pressenties mais non disponibles lors de la constitution de la base de données, surtout que la bibliographie confirme qu'elles peuvent affecter la consommation d'énergie globale.

Conclusions

La modélisation multivariée a permis de sélectionner les quelques variables véritablement décisives sur la consommation d'énergie des BA parmi les 45 variables proposées au départ, en faisant le tri parmi les relations indirectes et redondantes mises en évidence dans l'analyse bi-variée.

Cependant, la qualité d'ajustement des modèles obtenus n'est pas totalement satisfaisante et met en évidence :

- l'existence probable d'une ou plusieurs autres variables explicatives déterminantes sur la consommation d'énergie, mais qui font défaut dans la base de données ;
- l'incertitude élevée sur les coefficients lorsqu'ils sont calés sur un nombre trop restreint d'observations (cas du séchage des boues).

Les **variables retenues** font apparaître que la consommation énergétique des BA est d'abord déterminée par des facteurs de fonctionnement de l'installation imposés par l'extérieur (charges à traiter, caractéristiques des eaux usées, température de l'air). Les autres facteurs déterminants sont à la croisée de la conception et du fonctionnement : le taux de charge, et dans une moindre mesure le séchage des boues. La performance de traitement de la filière eau n'apparaît qu'à la marge (dans un seul modèle et au dernier rang), sous la forme du rendement en NTK.

Les **variables non retenues** indiquent que la plupart des éléments de conception pure disponibles dans la base, tels que la capacité de la station, son ancienneté ou la technologie d'aération, ne sont pas décisifs sur la consommation globale d'une BA. **Cependant, on ne peut pas conclure que toutes les variables qualitatives non retenues dans le modèle soient forcément sans effet**. En particulier, les variables mal renseignées ou comportant des modalités peu fréquentes peuvent avoir un effet réel sur la consommation énergétique sans qu'il soit possible de le mettre en évidence au niveau statistique. Ainsi, la **digestion aérobie** des boues est probablement un facteur d'augmentation de la consommation globale, mais

l'échantillon collecté ne compte qu'un cas isolé. A l'inverse, un niveau (réel) de traitement **C(P)** ou la combinaison de la digestion anaérobie avec la **valorisation du biogaz** devraient réduire la consommation globale, mais il reste impossible de le montrer avec 4 observations dans chaque cas. Il subsiste également un doute sur l'impact réel éventuel d'un étage **primaire** ($n_{obs} = 9$) ou **tertiaire** ($n_{obs} = 11$) sur la consommation globale. Le cas de la **désodorisation** reste également sujet à caution. S'il est normal de ne pouvoir montrer aucun impact d'une désodorisation biologique ou à charbon actif avec respectivement 10 et 5 observations, il est plus surprenant que la présence d'une désodorisation chimique apparaisse également non déterminant avec 31 observations concernées. Le fort taux d'inconnues sur cette variable (45 % soit $n_{obs} = 74$) oblige à rester prudent et ne permet pas d'affirmer avec certitude qu'une désodorisation est sans effet sur la consommation globale des BA.

1.4.3.2 Réacteurs biologiques séquentiels (SBR)

Les SBR comptent seulement 12 observations, dont aucune n'apparaît extrême. Leur étude se limite à une analyse bi-variée exploratoire. Les résultats de cette analyse sont rassemblés en Annexe 7.

Effet des variables explicatives quantitatives

Les tests de corrélation permettent d'identifier une à deux relations significatives pour chaque Y :

- la consommation totale (Y_{tot}) est corrélée positivement à la charge organique reçue ($r_s \approx 0,98$) ;
- la consommation spécifique Y_{tot_C} est corrélée positivement au ratio NTK/PT ($r_s \approx 0,69$). Il apparaît également une corrélation négative avec le ratio C/N, mais il est impossible de dire s'il s'agit d'un effet induit ou complémentaire à celui du ratio N/P ;
- la consommation spécifique Y_{tot_V} est corrélée positivement à la concentration des eaux usées ($r_s \approx 0,87$). Elle est également corrélée aux rendements d'élimination de la charge carbonée, mais il s'agit vraisemblablement d'un effet induit par la corrélation rendements – concentration.

Ces relations sont illustrées graphiquement en Annexe 7. Pour Y_{tot} et Y_{tot_V} , on retrouve les variables explicatives de rang 1 déjà identifiées pour les BA. Pour Y_{tot_C} , il est surprenant que l'effet de la teneur des eaux usées en azote, donc de la charge à nitrifier, apparaisse comme plus fort que celui du taux de charge organique. Soit ce résultat est lié au faible nombre d'observations, soit il s'agit d'une spécificité des SBR. Cette seconde hypothèse paraît toutefois peu probable.

Effet des variables explicatives qualitatives

Les tests ne mettent en évidence aucun lien entre la consommation énergétique et les variables qualitatives. En particulier, la technologie d'agitation ou le niveau de rejet semblent sans effet. Cela n'exclut cependant pas l'existence de relations : avec un nombre d'observations par modalité inférieur à 12, la puissance des tests reste insuffisante.

Conclusions

Ces résultats restent très partiels. Il est probable que le manque de puissance des tests pour l'échantillon disponible ne permette pas d'identifier toutes les relations existantes entre la consommation d'énergie des SBR et les variables explicatives disponibles. De plus, il est possible que des variables non disponibles dans la base de données interviennent (présence d'un bassin tampon ou d'une zone de contact, organisation des cycles de traitement, mode d'asservissement et réglages de l'aération, caractéristiques de la boue activée, ...).

1.4.3.3 Bioréacteurs à membranes (BRM)

Le Tableau 9 résume les 6 modèles obtenus pour expliquer et prédire la consommation d'énergie des BRM par l'analyse multivariée. Selon l'unité et le référentiel choisis, elle est déterminée par 2 à 4 variables explicatives. Les graphiques illustrant l'ajustement des modèles sont présentés en Annexe 8.

Tableau 9. Variables explicatives déterminantes sur la consommation d'énergie des BRM

		Référentiel DCO						Référentiel DBO5					
		Ytot		Ytot_DCO		Ytot_V		Ytot		Ytot_DBO		Ytot_V	
		Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang
Caractéristiques eaux usées	Concentration C	↗→	2	↘	2	↗→	2	↗	3	↘	2	↗↘	2
	DCO/DBO5	↘	4										
Charge filière eau	Débit reçu	↗	1					↗	1				
	Taux de charge C	↘	3	↘	1	↘	3	↘	4	↘	1		
	Taux de charge hydraulique					↘	1	↘	2			↘	1
Conception	Membranes					FC > MP	4			FC > MP	3	FC > MP	3
Evaluation du modèle	Nombre d'observations utilisées		28		30		31		29		31		31
	Nombre de variables X		4		2		4		4		3		3
	R2 ajusté		0.998		0.878		0.842		0.989		0.879		0.797
	Résidus distribués normalement		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui
	Résidus indépendants de Y		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui
	Résidus indépendants de X		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui

Parmi les 55 observations BRM initialement disponibles, seules une trentaine ont pu être utilisées pour développer les modèles : les autres observations ont dû être écartées soit parce qu'elles sont incomplètes (au moins l'une des variables explicatives est manquante), soit parce qu'elles apparaissent extrêmes.

Consommation absolue (Ytot)

La consommation absolue des BRM est déterminée par 4 variables quantitatives.

Le déterminant principal est la **charge hydraulique reçue**, et non la charge organique comme pour les BA.

Le décolmatage et la maintenance préventive des membranes implique des opérations spécifiques (décolmatage par injection de moyennes à grosses bulles, rétrolavages), plus ou moins coûteuses en énergie, et dont la consommation est soit constante, soit dépendante du débit reçu (mais pas de la charge organique). Ceci suggère aussi que l'indicateur de consommation spécifique le plus pertinent pour les BRM serait Ytot_V plutôt que Ytot_C. On retrouve donc parmi les variables explicatives complémentaires de Ytot celles qui sont le plus déterminantes sur Ytot_V : la **concentration** des eaux usées et le **taux de charge** organique et/ou hydraulique sont déterminantes sur les deux variables dans les deux référentiels, avec respectivement un effet croissant et décroissant qui seront commentés dans le paragraphe dédié à Ytot_V.

Dans le référentiel DCO, le modèle Ytot intègre également le **ratio DCO/DBO₅** des eaux usées, avec un effet négatif : ceci revient en quelque sorte à convertir la DCO en DBO₅ dans l'équation. Cette variable explicative disparaît évidemment du modèle Ytot dans le référentiel DBO₅. Ceci suggère que la DBO₅ serait un meilleur indicateur de la charge organique et de ses effets sur la consommation d'énergie absolue des BRM que la DCO.

Consommation spécifique par rapport à la charge organique (Ytot_C)

Dans le référentiel DCO, Ytot_C est déterminée par 2 variables quantitatives.

L'effet du **taux de charge organique** possède le même sens et la même interprétation que celui observé sur les BA. L'effet décroissant de la **concentration** des eaux usées représente l'effet de la réduction des dépenses énergétiques pour les fonctions hydrauliques avec la concentration. La valeur maximale observée sur les BRM ne dépassant pas 1000 mgDCO/L, une inversion du sens de la relation, observée chez les BA pour les effluents très concentrés, n'est pas mise en évidence sur les BRM.

Le référentiel DBO₅ sélectionne une troisième variable, de nature qualitative : le **type de membrane**. Le coefficient associé à la variable « membranes » signifie que, toutes conditions étant égales par ailleurs, les fibres creuses (FC) consomment 10 % de plus que les membranes planes (MP). La différence est statistiquement significative et a été obtenue avec un nombre d'observations équilibré entre les deux modalités (14 FC et 17 MP). Les FC sont équipées d'un système de pompage pour assurer une dépression en phase de filtration et inverser le sens du flux en phase de rétrolavage. Pour les MP, la filtration est gravitaire et il n'y a pas de rétrolavage. Cependant, l'ordre de grandeur de l'écart observé dépasse la consommation de ce seul pompage : il existe peut-être aussi des différences sur l'aération membranaire (durée, intensité,...), ou sur la recirculation dans le cas des configurations séparées.

Contrairement aux BA, le ratio C/N n'est pas déterminant sur la consommation des BRM : sa plage de variation est plus restreinte, et la variabilité des dépenses énergétiques associées à la filtration prime sur celle des fonctions biologiques. Le traitement des boues n'est pas non plus déterminant chez les BRM, car ils sont équipés de filières boue peu différenciées (78 % des observations correspondent à des siccités comprises entre 18 et 35 %).

Consommation spécifique par rapport à la charge volumique (Ytot_V)

Dans le référentiel DCO, Ytot_V est déterminée par 3 variables quantitatives et une variable qualitative.

L'effet décroissant du taux de charge est représenté par le **taux de charge hydraulique** au premier rang, et complété par le **taux de charge organique** au troisième rang. Ce n'est pas de l'information redondante, car les deux variables ne sont que faiblement corrélées. Le taux de charge hydraulique pourrait traduire le fait que l'aération membranaire n'est que partiellement modulable, en intensité et/ou en durée, en fonction de la charge hydraulique ; tandis que le taux de charge organique traduirait plutôt les limites de flexibilité de l'aération biologique face à la charge organique à traiter. L'effet croissant de la **concentration** des eaux usées traduit l'apport de charge organique associé à la charge hydraulique, comme chez les BA. Enfin, on retrouve l'effet du **type de membrane** déjà discuté sur Ytot_DBO : il se présente ici sous la forme d'un coefficient additif, qui signifie que les fibres creuses consomment en moyenne 0,12 kWh/m³ de plus que les membranes planes, toutes conditions étant égales par ailleurs.

Validité et qualité d'ajustement des modèles

Toutes les hypothèses sur les résidus sont respectées (normalité, indépendance) et la qualité d'ajustement est très bonne pour les 6 modèles. Cependant, la validation des modèles a nécessité l'élimination d'une proportion élevée d'observations extrêmes. Le faible nombre d'observations restantes a pour effet de réduire la quantité d'information sur la variabilité et sur les variables déterminantes.

Conclusions

La modélisation multivariée a permis d'isoler entre 2 et 4 variables explicatives déterminantes sur la consommation d'énergie des BRM. Les **variables retenues** indiquent que **leur consommation globale est gouvernée par la demande des processus hydrauliques** (filtration et aération de décolmatage associée) avant celle des processus biologiques (demande en oxygène et aération biologique associée). Comme pour les BA, les variables décisives sont d'abord des conditions de fonctionnement, déterminées par le réseau d'assainissement seul (débit à traiter, concentration des eaux usées) ou en lien avec la conception de la station (taux de charge). L'effet de la conception seule n'apparaît qu'à travers la technologie membranaire, et son impact dans les modèles se situe au dernier rang.

Les **variables non retenues** dans les modèles sont soit sans effet sur la consommation énergétique, soit présentent une variabilité trop réduite pour qu'un effet discriminant apparaisse. Ainsi, la filière boues n'est pas déterminante sur la consommation globale des BRM, vu que la conception et le niveau de siccité diffèrent peu entre les installations. De même, les **membranes tubulaires** sont une modalité absente des équations. La seule observation concernée ne suffit pas à déterminer un coefficient, et elle a donc été considérée extrême.

Le modèle a été construit sur un échantillon petit en absolu (n_{obs} validées = 48), ce qui est une source d'instabilité dans le développement des modèles : il peut suffire d'ajouter ou de retirer quelques observations pour modifier leur expression mathématique (variables déterminantes et coefficients associés). La validité et la qualité des modèles obtenus est néanmoins meilleure que pour les BA. Cependant, il est probable que l'effet de la charge hydraulique et du type de membranes aurait pu être affiné si la base de données avait contenu, par exemple, les flux de filtration ($L/(m^2.h)$) et les débits d'air spécifiques appliqués ($Nm^3/(m^2.h)$).

1.4.3.4 Biofiltres (BF)

Le Tableau 10 résume les 6 modèles obtenus pour expliquer et prédire la consommation d'énergie des BF par l'analyse multivariée. Selon l'unité et le référentiel choisis, elle est déterminée par 2 à 6 variables explicatives. Les graphiques illustrant l'ajustement des modèles sont présentés en Annexe 9.

Tableau 10. Variables explicatives déterminantes sur la consommation d'énergie des BF

		Référentiel DCO						Référentiel DBO5					
		Ytot		Ytot_DCO		Ytot_V		Ytot		Ytot_DBO		Ytot_V	
		Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang
Géographie	Température air			↘	2								
Caractéristiques eaux usées	Concentration C					↗	2					↗	2
	C/MES					↗	5						
Charge filière eau	Charge C reçue	↗	1			↘	4	↗	1				
	Taux de charge C	↘	2	↘	1			↘	2	↘	1		
	Taux de charge hydraulique					↘	1					↘	1
Performances filière eau	Concentration NTK sortie	↘	3					↘	3	↘	2		
	Rendement NTK			↗	3	↗	3					↗	3
Conception	Séchage					SEC > ABS	6						
	Nombre d'observations utilisées	45		41		43		47		46		41	
	Nombre de variables X	3		2		6		3		2		3	
Evaluation du modèle	R2 ajusté	0.952		0.656		0.856		0.952		0.690		0.903	
	Résidus distribués normalement	Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui	
	Résidus indépendants de Y	Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui	
	Résidus indépendants de X	Oui		Oui		Oui		Oui		Oui		Oui	

Parmi les 55 observations BF initialement disponibles, seules 41 à 47 ont pu être utilisées pour développer les modèles : les autres observations ont dû être écartées soit parce qu'elles sont incomplètes (au moins l'une des variables explicatives est manquante), soit parce qu'elles apparaissent extrêmes.

Consommation absolue (Ytot)

La consommation absolue des BF est déterminée par 3 variables quantitatives, qui sont identiques dans les deux référentiels.

Le déterminant principal est la **charge organique reçue**. Ceci suggère que l'indicateur de consommation spécifique le plus pertinent pour les BF serait Ytot_C. Sa dispersion relative est cependant élevée, même si elle reste légèrement inférieure à celle de Ytot_V. Les variables explicatives complémentaires de Ytot sont donc celles qui déterminent aussi Ytot_C, qui seront discutées ci-dessous.

Consommation spécifique par rapport à la charge organique (Ytot_C)

Dans le référentiel DBO₅, Ytot_C est déterminée par 2 variables quantitatives :

- le **taux de charge organique**, avec un effet décroissant comme pour les autres procédés ;
- la **performance de nitrification**, qui affecte la demande en oxygène et donc en aération, mais aussi la conception et le dimensionnement des BF.

Selon les modèles, la performance de nitrification est représentée soit par le rendement d'élimination du NTK (avec un effet croissant), soit par sa concentration de sortie (avec un effet décroissant). Les deux variables ont un rôle équivalent.

Dans le référentiel DCO, la **température de l'air** est incluse dans le modèle, entre le taux de charge organique et le rendement en NTK. Son effet sur Ytot_C est décroissant, alors qu'il était croissant dans le cas des BA. Ceci indique que pour les BF, l'effet négatif de la température sur la demande en chauffage des bâtiments prime sur son effet positif sur la demande d'aération. Les BF couvrent une plage de température plus étendue que les BA vers les températures froides, avec un quart de l'échantillon situé en montagne (altitude > 800 m). L'effet des températures hivernales en montagne est amplifié par une fréquente couverture totale des ouvrages, qui augmente les volumes de bâtiments à chauffer.

Consommation spécifique par rapport à la charge hydraulique (Ytot_V)

Dans le référentiel DBO₅, Ytot_V est déterminée par 3 variables quantitatives :

- le **taux de charge hydraulique** et la **concentration** des eaux usées ont des effets similaires à ceux observés sur les autres procédés ;
- la **performance de nitrification**, que l'on retrouve dans tous les modèles des BF.

Dans le référentiel DCO, 3 autres variables viennent compléter l'équation :

- la **charge organique reçue** : cette variable intègre à la fois l'effet de la taille de l'installation et de son taux de charge. Son effet décroissant indique que Ytot_V augmente pour les petites stations et/ou pour les taux de charge organiques faibles.

- le ratio C/MES de l'eau usée : presque tous les BF sont équipés d'une décantation primaire. Une augmentation du ratio C/MES implique donc une augmentation de la charge organique restant à traiter sur l'étage secondaire, et donc de sa consommation d'énergie pour l'aération et les lavages.
- le séchage des boues, avec les mêmes effets et limites que pour les BA. Selon le coefficient associé à cette variable, le séchage augmente la consommation sur le périmètre global de la station de 37 %. Cette valeur rejoint celle obtenue pour Ytot_V pour les BA dans le référentiel DBO5 (35 %). Elle reste cependant difficilement applicable pour la prédiction d'un site particulier puisqu'elle a été ajustée sur seulement 5 observations représentant des situations très différentes.

Validité et qualité d'ajustement des modèles

Toutes les hypothèses sur les résidus sont respectées (normalité, indépendance). Le cadre multilinéaire est donc suffisant pour représenter les phénomènes observés. La qualité d'ajustement sur Ytot_V est bien meilleure que celle atteinte pour les BA et BRM, tandis que c'est l'inverse pour Ytot. La qualité d'ajustement sur Ytot_C est moins bonne que pour les 4 autres modèles, mais reste acceptable.

Il est possible que des variables absentes de la base de données permettent d'améliorer la qualité des modèles pour Ytot et Ytot_C à l'avenir. On peut par exemple citer la charge volumique ou surfacique appliquée sur les cellules, ou la technologie et la quantification des lavages (volume d'air et d'eau, fréquence,...).

Conclusions

La modélisation multivariée a permis d'isoler entre 2 et 6 variables explicatives déterminantes sur la consommation d'énergie des BF. Les **variables retenues** indiquent que leur consommation globale est prioritairement déterminée par la charge organique à traiter, qui détermine les besoins en aération et en lavage, et par les performances de traitement du NTK. La nitrification impose des volumes de cellule supplémentaires, qui doivent aussi être aérés et lavés. Lorsque ces volumes sont organisés sur un 2^e étage, ils engendrent aussi une consommation supplémentaire de pompage.

Jusqu'ici, la performance de nitrification n'était apparue que furtivement dans un modèle (Ytot_V pour les BA). Pour les BF, le rendement sur le NTK est un facteur beaucoup plus discriminant : il s'étale de 26 % à 96 %, tandis que les BA, et plus généralement les cultures libres, assurent un rendement > 75 % à quelques exceptions près. De ce fait, le facteur discriminant de la nitrification pour les BA est plutôt la charge en azote à traiter, par l'intermédiaire du ratio C/N qui varie de 4 à 23 gDCO/gNTK.

D'autres variables, telles que le ratio C/MES, la température de l'air ou le séchage des boues, apparaissent de manière ponctuelle pour les BF. Il est surprenant qu'elles

n'interviennent pas dans toutes les équations. Il est probable que le nombre d'observations avec séchage ($n_{\text{obs}} = 5$) soit trop faible dans l'échantillon pour que cette variable devienne significative dans tous les cas. Comme pour les BRM, le faible nombre d'observations utilisables dans le développement des modèles des BF ($n_{\text{obs}} = 48$) engendre un manque de robustesse se traduisant par des instabilités dans la sélection des variables explicatives et le calcul des coefficients associés. Néanmoins, les 6 modèles des BF sont validés. La qualité d'ajustement est moyenne à bonne, et pourrait probablement être améliorée avec quelques variables explicatives complémentaires dont on ne dispose pas à ce stade (charges spécifiques appliquées, caractéristiques des lavages,...).

Parmi les **variables explicatives non retenues**, on note que la technologie et le nombre d'étages ne semblent pas déterminants sur la consommation d'énergie globale. De même, les performances de dénitrification (rendement NGL) n'apparaissent pas sensibles, alors que 11 observations atteignent le niveau CNDN(P). La dénitrification demande des volumes de cellule supplémentaires, mais sans aération : la dépense énergétique supplémentaire se limite aux lavages et au pompage pour renvoyer les nitrates en tête ($n_{\text{obs}} = 7$). De plus, la pré-dénitrification consomme une fraction de la charge organique à traiter, ce qui représente une économie d'aération pour l'aval.

1.4.3.5 Lits fluidisés sur supports plastiques mobiles (MBBR)

Les MBBR comptent 9 observations, dont une jugée extrême. Leur étude se limite à une analyse bi-variée exploratoire. Les résultats de cette analyse sont rassemblés en Annexe 10.

Effet des variables explicatives quantitatives

Les tests de corrélation permettent d'identifier seulement deux relations significatives :

- la consommation totale (Y_{tot}) est corrélée positivement à la charge organique reçue ($r_s = 0,95$);
- la consommation spécifique $Y_{\text{tot_V}}$ est corrélée positivement à la concentration des eaux usées ($r_s = 0,93$). Elle est également corrélée aux rendements d'élimination de la charge carbonée, mais il s'agit vraisemblablement d'un effet induit par la corrélation rendements – concentration.

Ces relations sont illustrées graphiquement en annexe 10. On retrouve donc les variables explicatives de rang 1 ou 2 déjà identifiées pour les autres procédés. Pour $Y_{\text{tot_C}}$, aucune variable explicative ne ressort des tests de corrélation.

Effet des variables explicatives qualitatives

Les tests ne mettent en évidence aucun lien entre la consommation énergétique et les variables qualitatives. En particulier, on ne montre pas d'effet du nombre d'étages, de la technologie de séparation finale, ni du niveau de rejet. Cela n'exclut cependant pas l'existence de relations : avec un nombre d'observations par modalité inférieur à 8, la puissance des tests est très insuffisante.

Conclusions

Ces résultats restent très partiels. Il est probable que le manque de puissance des tests pour l'échantillon disponible ne permette pas d'identifier toutes les relations existantes entre la consommation d'énergie des MBBR et les variables explicatives disponibles. De plus, il est possible que des variables non disponibles dans la base de données interviennent (type de support plastique, taux de remplissage des bassins, technologie d'aération et de brassage,...).

1.5 Positionnement de la France par rapport à l'étranger - cas des cultures libres

Après avoir effectué un état des lieux de la consommation énergétique au niveau national et déterminé ses principaux facteurs explicatifs, l'analyse suivante vise à situer la France par rapport à l'étranger et expliquer les éventuelles différences observées. Une base de données mondiale limitée aux 3 procédés à cultures libres a été constituée à cet effet. Il convient de rappeler que les données étrangères proviennent exclusivement de sources bibliographiques. Les données françaises sont celles de l'échantillon validé, complétées par quelques données bibliographiques.

1.5.1 Comparaison des consommations spécifiques en France et à l'étranger

La

Figure 8 compare les distributions des consommations spécifiques des 3 procédés à culture libre relevées à l'étranger et en France. Des éléments chiffrés sont disponibles en Annexe 11.

La consommation spécifique des BA et des SBR observée en France est globalement supérieure à celle de l'étranger, ce qui est confirmé par les tests statistiques. Il faudrait en moyenne 50 % à 60 % d'énergie de plus en France qu'à l'étranger pour traiter les mêmes charges organiques avec ces deux procédés.

Le cas des BRM est différent. Premièrement, les valeurs étrangères sont exprimées en kWh/m³ uniquement : ceci renforce l'idée que Ytot_V serait plus pertinente que Ytot_C pour caractériser la consommation spécifique de ce procédé. Ensuite, il n'y a pas de différence significative sur les moyennes des valeurs étrangères et françaises. Par contre, la dispersion relative (coefficient de variation) ou même absolue (amplitude max - min, écart-type) des données étrangères est supérieure, ce qui est aussi le cas pour les BA : la principale raison est que les données considérées comme extrêmes ont été supprimées de l'échantillon français, alors que les données étrangères n'ont pas été expurgées faute de critère de sélection objectif applicable à la base bibliographique. D'ailleurs, si l'on fait abstraction des 4 points qui dépassent 3,0 kWh/m³ dans le groupe des BRM étrangers, on devine qu'il existe en fait aussi un décalage avec les consommations des BRM français.

La construction et l'exploitation d'une base de données bibliographique, en parallèle de la base française, permet donc de montrer que la **France se différencie du contexte international par des consommations d'énergie spécifiques significativement supérieures**, au moins pour les BA et SBR.

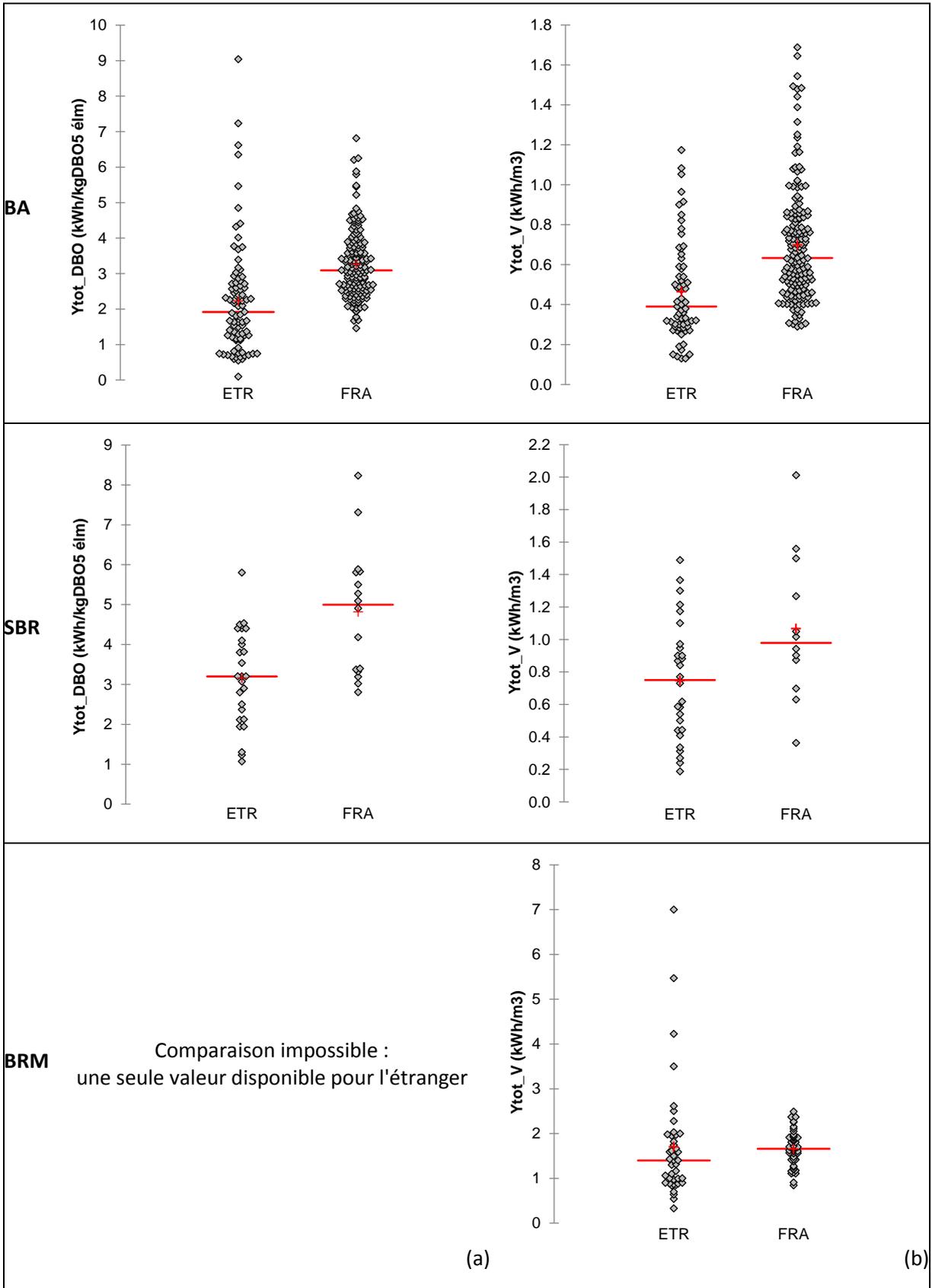


Figure 8. Comparaison des consommations spécifiques observées à l'étranger et en France pour les 3 cultures libres (a) par rapport à la charge en DBO_5 (b) par rapport au volume

1.5.2 Explication des écarts de consommation spécifique entre la France et l'étranger

Les variables déterminantes disponibles dans la base de données mondiale sont comparées entre la France et l'étranger, afin d'évaluer si elles peuvent expliquer les écarts constatés sur les consommations spécifiques des cultures libres françaises et étrangères. Pour les BA et les BRM, les modèles prédictifs développés dans la partie 1.4.3 peuvent servir à quantifier l'écart. Le rôle d'autres facteurs, non disponibles dans la base de données ou dont l'effet est probable mais pas prouvé, sera également discuté.

1.5.2.1 Variables explicatives disponibles dans la base mondiale

Boues activées (BA)

Les BA de l'étranger se distinguent des BA françaises par des capacités nominales et des taux de charge significativement supérieurs, et un niveau de traitement C plus fréquent. Ces trois facteurs se combinent pour jouer dans le sens de l'écart observé sur les consommations spécifiques (ETR < FRA). Selon les modèles, le seul écart entre les taux de charge organiques des deux groupes (médiane de 53 % en France et 79 % à l'étranger) pourrait engendrer un écart de 8 % sur Y_{tot_DBO} , alors que l'écart total observé entre les consommations spécifiques médianes est de 48 % : ce n'est donc pas le facteur explicatif principal.

Les BA étrangères sont aussi plus souvent équipées d'une digestion anaérobie, qui est susceptible de réduire sensiblement la consommation spécifique globale des stations non nitrifiantes et/ou qui valorisent leur biogaz sur site au-delà du seul chauffage des digesteurs.

Au bilan, il est probable que les différences sur les capacités, les taux de charge, la fréquence du niveau de traitement C et de la digestion anaérobie engendrent un écart significatif sur les consommations spécifiques entre l'étranger et la France, qui est en partie réduit par la prévalence du niveau CN à l'étranger.

Réacteurs biologiques séquentiels (SBR)

La capacité des SBR étrangers est équivalente voire inférieure à celle des SBR français. Ils peuvent aussi être équipés d'une digestion aérobie des boues ($n_{obs} = 4$ soit 14 %), alors qu'on n'en compte aucune dans l'échantillon français. Ces deux tendances jouent dans le sens contraire à l'écart observé sur les consommations spécifiques.

Néanmoins, comme pour les BA, le taux de charge des SBR étrangers est significativement supérieur à celui observé en France, ce qui joue dans le sens de l'écart observé (ETR < FRA).

Au bilan, il est probable que l'impact du taux de charge soit le plus déterminant, et qu'il ne soit que partiellement réduit par les effets opposés de la capacité et de la prévalence de la digestion aérobie.

Bioréacteurs à membrane (BRM)

Comme pour les BA, les capacités et les taux de charge des BRM sont supérieurs à l'étranger, ce qui joue dans le sens de l'écart observé sur les consommations spécifiques (ETR < FRA). Selon les modèles, l'écart entre les taux de charge hydrauliques des deux groupes (médiane de 43 % en France et 69 % à l'étranger) pourrait expliquer à lui seul l'écart total de 20 % observé entre les consommations spécifiques médianes.

Néanmoins, certains BRM étrangers sont équipés de membranes tubulaires ($n_{\text{obs}} = 4$ soit 10 %) ou d'une digestion aérobie ($n_{\text{obs}} = 5$ soit 12 %), alors qu'on n'en compte aucun dans l'échantillon français validé: ces facteurs jouent dans le sens contraire sur les consommations spécifiques (ETR > FRA).

Au bilan, on peut penser que les différences sur les capacités et les taux de charge engendrent un écart significatif sur les consommations spécifiques entre l'étranger et la France, qui est en partie réduit par la prévalence des digestions aérobies et des membranes tubulaires en configuration externe à l'étranger.

1.5.2.2 Facteurs explicatifs complémentaires

Autres facteurs géographiques

Les **caractéristiques des eaux usées** ont un lien avec la géographie. Par exemple, les eaux usées sont globalement plus diluées aux Etats-Unis et en Australie car les consommations d'eau spécifiques (L/(EH.j)) y sont significativement plus élevées qu'en France. La dilution est un facteur qui réduit $Y_{\text{tot_V}}$, mais accroît $Y_{\text{tot_DBO}}$.

Une autre spécificité française est un **âge de boue** plus long qu'à l'étranger, pour assurer la nitrification fréquemment requise en France et stabiliser les boues en l'absence de digestion anaérobie. Or selon la bibliographie, la consommation spécifique augmente avec l'âge de boue.

Il est aussi possible que les **efforts d'optimisation** énergétique soient plus avancés à l'étranger pour les procédés récents. Ainsi, les solutions de régulation des cycles des SBR ou de l'aération de décolmatage des BRM semblent plus développées et surtout plus appliquées en exploitation.

Biais bibliographiques

En outre, l'existence de biais qui concourent à sous-estimer les consommations rapportées dans la bibliographie, et donc les valeurs de l'échantillon étranger, est soupçonnée.

Les observations provenant de stations optimisées sur le plan énergétique sont probablement surreprésentées dans la base bibliographique, puisque les publications qui rapportent des consommations portent préférentiellement sur l'efficacité énergétique.

Chapitre 2. Consommation énergétique par postes fonctionnels

Une méthode de calcul des consommations énergétiques par postes au pas de temps journalier a été développée et appliquée sur quelques sites à cultures libres (BA, BRM et SBR). Cette méthode n'a aucun intérêt pour la détermination de la consommation d'énergie globale lorsque la mesure existe. Par contre, elle permet d'obtenir la décomposition relative de la consommation énergétique et de calculer des consommations spécifiques par postes et d'identifier des pistes d'économie individualisées. Elle nécessite des données de fonctionnement exhaustives, détaillées et fiables, qui ont été fournies directement par les exploitants des stations partenaires de l'étude.

Les postes et sous-postes sont des sous-ensembles fonctionnels de la station, dont la consommation énergétique peut être exprimée sous 3 formes :

- absolue, en kWh/j ;
- relative, en % ;
- spécifique, rapportée à une unité fonctionnelle (flux massique, flux volumique, ou surface des bâtiments).

Chaque expression possède une signification et des applications différenciées. Les **consommations absolues** permettent, outre de calculer les autres indicateurs, de suivre les évolutions dans le temps et d'étudier les corrélations avec les variables de fonctionnement au sein d'une installation. Les **consommations relatives** permettent de comparer et hiérarchiser les postes entre eux au sein d'une même installation, tandis que les **consommations spécifiques** permettent de comparer les installations entre elles et à des références. Il n'y a aucune relation entre ces deux dernières expressions, et il faut éviter de comparer des stations sur la base de leurs consommations relatives, au risque d'aboutir à des conclusions erronées.

Contrairement à la consommation globale, qui est mesurée par le compteur général, les consommations par (sous-)postes sont obtenues par le calcul. Les compteurs divisionnaires sont en effet peu fiables, car leur existence et leur enregistrement en supervision ne sont pas systématiques, leur périmètre de mesure est mal défini et variable d'un site à l'autre. La démarche de calcul consiste à estimer la consommation individuelle de chaque équipement électrique à partir de ses caractéristiques et de ses données de fonctionnement disponibles (durée, vitesse,...), puis à calculer les sommes partielles par sous-postes et par postes, ainsi que la somme globale.

Elle a été mise au point et appliquée sur 8 installations françaises à cultures libres : 3 BA, 3 SBR et 2 BRM. Une synthèse des résultats est présentée. Cependant cet échantillon est trop petit pour pouvoir proposer de nouvelles références.

2.1 Méthodologie

La méthode proposée requiert une masse considérable de données sur la description et le fonctionnement de l'installation sur une durée d'au moins une année entière (ou plusieurs années entières), et sa mise en œuvre est lourde. La mise en forme et la validation des données puis des résultats de calcul sont d'autant plus chronophages que les données sont incomplètes ou de qualité médiocre. En outre, certains points de la démarche ne sont pas standardisables : estimation de la consommation des bâtiments et des équipements à fréquence variable, recherche et réduction de l'erreur... Ils nécessitent une approche d'expert à adapter au cas par cas en fonction des données disponibles.

2.1.1 Définition des postes et sous-postes

La définition des postes et sous-postes adoptée dans cette étude correspond à un découpage fonctionnel plutôt que spatial. Ceci dit, certaines fonctions qui auraient en principe mérité d'être individualisées (ex : traitement primaire) ont été regroupées avec d'autres afin de limiter le nombre de postes et d'éviter des résultats systématiquement négligeables.

On a défini 8 postes (Tableau 11), dont 6 obligatoires (toujours présents) et 2 facultatifs (possiblement absents). Leurs périmètres sont précisés ci-dessous.

Tableau 11. Liste des postes dans la méthode Irstea

Postes obligatoires	EAU
	BOUES
	AIR
	LOCAL EXPLOITATION
	DIVERS
	ERREUR
Postes facultatifs	GRAISSES
	TERTIAIRE

Les quatre premiers postes du Tableau 11 ont été découpés en sous-postes, qui sont listés et définis dans le Tableau 12. Ils sont pour la plupart facultatifs. Malgré les précautions prises, le découpage adopté n'est pas suffisamment générique ni totalement rigoureux. L'usage a par exemple montré que les périmètres de certains sous-postes pouvaient se chevaucher. Le calcul de la consommation globale reste juste, puisque chaque équipement n'est compté qu'une fois, mais la comparaison des résultats par (sous-)postes à des références ou à ceux d'une autre installation peut être biaisée selon les choix d'affectation effectués. Un découpage amélioré a été mis au point à la fin de l'étude, et sera appliqué pour les futurs audits.

Tableau 12. Liste et périmètre des sous-postes dans la méthode Irstea

Poste	Sous-poste	Périmètre	
EAU	relevage	relevage en tête, relevages intermédiaires hors celui du bassin tampon, relevage de sortie	
	prétraitements	dégrillage, dessablage, dégraissage, tamisage, réception stockage et traitement des apports externes hors graisses et boues (matières de vidange, de curages, ...)	
	bassin tampon	pompage de reprise, agitation ...	
	aération + agitation	aération biologique	surpresseurs et ventilateurs de capot associés, turbines ou brosses
		aération membranes	surpresseurs et ventilateurs de capots associés pour décolmatage membranes (BRM seulement)
		agitation BA	agitation associée à l'aération biologique
		agitation hors BA	agitation de l'étage biologique hors aération (zones de contact, anaérobies, anoxies,...)
		recirculation interne	recirculation entre les zones de traitement biologique (aération vers anoxie, anoxie vers anaérobie,...)
		recirculation externe	recirculation de l'ouvrage de séparation des boues (clarification, filtration, flottation..) vers une zone de traitement biologique
		pompages divers	pompes de dosage et injection de réactifs, postes toutes eaux, pompes de perméat/rétrolavage ...
	décantation	primaire et secondaire : pont tournant/roulant, pompes d'amorçage, pompes à flottants, brosses ou pompes de nettoyage automatisé, ...	
BOUES	extraction	pompage d'extraction de l'ouvrage de séparation	
	épaississement	pompage d'alimentation et fonctionnement des équipements d'épaississement (silo, égouttage dynamique, flottateur, centrifugeuse,...)	
	conditionnement chimique	préparation et injection de polymères ou floculant (agitateurs, pompes,...)	
	déshydratation	pompage d'alimentation et fonctionnement des équipements de déshydratation (filtre bande, filtre à plateaux, centrifugeuse,...)	
	digestion	pompage d'alimentation, éventuels prétraitements (thermique, mécanique,...), et fonctionnement des digesteurs aérobies ou anaérobies	
	chaulage	stockage, injection et mélange de la chaux	
	séchage solaire	alimentation (convoyage) et fonctionnement des serres de séchage solaire, y compris leur traitement de l'air	
	séchage thermique	alimentation (convoyage), génération de chaleur et fonctionnement des sècheurs, y compris leur traitement de l'air	
	incinération	alimentation (convoyage), combustible éventuel et fonctionnement des incinérateurs, y compris leur traitement de l'air	
	stockage	alimentation (pompage ou convoyage) et fonctionnement (agitation,...) des ouvrages de stockage. Comprend le stockage initial des boues liquides extraites (silo), le stockage intermédiaire entre les étages de la filière boue (bâches), et le stockage final avant évacuation (silo, benne, aire à boues, ...)	
AIR	ventilation	renouvellement d'air sans traitement d'odeur ni régulation thermique associée	
	désodorisation	circulation air et liquides vers/dans les tours de désodorisation	
	chauffage	aérothermes, convecteurs,...des locaux techniques	
	climatisation	aérothermes, climatiseurs,...des locaux techniques (armoires électriques principalement)	
LOCAL EXPLOITATION	chauffage		
	climatisation		
	autres usages	éclairage, ventilation, eau chaude sanitaire, informatique, électroménager, instrumentation de laboratoire,...	

2.1.2 Calcul de la consommation par postes

Un schéma d'ensemble de la méthode développée par Irstea est présenté en Figure 9. Elle comprend quatre grandes étapes.

La **première étape** consiste à **collecter les données** nécessaires, dont la liste est précisée en Annexe 12. La méthode requiert des données descriptives et des données de fonctionnement au pas de temps journalier sur une durée d'une ou plusieurs années, complétées par des bilans mensuels et annuels.

L'expérience a montré des **difficultés récurrentes** dans la collecte et l'analyse des données concernant les équipements :

- Les données descriptives sont souvent incomplètes, et plus ou moins conformes à la réalité suite à des défauts d'actualisation des documents (récolement en fin de réalisation, puis lors du renouvellement des équipements) ;

- Les données de fonctionnement sont souvent incomplètes suite à des défauts d'horodatage, d'enregistrement, ou d'archivage des données en supervision ;
- Le recensement et l'identification des équipements n'est jamais identique entre les données descriptives et fonctionnelles, ce qui demande d'établir une table des correspondances entre les deux sources.

La seconde étape est un travail de **mise en forme et de validation des données**, qui peut s'avérer d'autant plus long et compliqué que la qualité ou la quantité des données est insuffisante. Il s'agit de :

- connaître et comprendre la conception de la station, situer précisément les points de mesure ;
- confronter les différentes sources de données entre elles pour constituer un jeu de données final consolidé et le plus complet possible, et le valider ;
- organiser les données consolidées et validées dans des fichiers « modèles » ;
- effectuer un premier niveau de calcul pour déterminer les variables de fonctionnement de la station, et les valider.

La troisième étape correspond à la procédure de **calcul des consommations absolues**. Les consommations des moteurs sont estimées par le produit de leur puissance absorbée (Pa) et de leur temps de marche (TDM). Une méthode de calcul de la consommation des moteurs est présentée en Annexes 13 et 14. Ces consommations absolues sont ensuite sommées, et ventilées par postes.

L'un des points importants de la démarche proposée est la définition d'un **poste Erreur** obligatoire, qui représente la différence (positive ou négative) entre la consommation globale mesurée (compteur général ou factures du fournisseur d'énergie) et calculée. L'objectif est de minimiser cette erreur, qui regroupe :

- les équipements dont la consommation n'a pas pu être estimée par manque de données ;
- les erreurs sur les puissances absorbées estimées et sur les temps de marche enregistrés.

Pour le premier point, il s'agit d'estimer les consommations manquantes, en sollicitant l'aide du chef de station. Les appareils affectés aux locaux techniques et d'exploitation, en particulier sur les sous-postes chauffage et climatisation, sont très souvent concernés. Une démarche alternative a été mise au point pour estimer la consommation de ces sous-postes à partir de la température de l'air extérieur (cf. Annexe 15).

Pour le second point, il faut identifier les équipements en cause, en étudiant la corrélation entre l'erreur et les temps de marche et les variables de fonctionnement, puis appliquer des corrections tout en restant dans des hypothèses plausibles.

Dans les deux cas, il s'agit d'un travail d'expert, et qui peut devenir très chronophage. L'idéal est d'aboutir à une erreur relative comprise entre -5 % et +5 %. En pratique, celle obtenue sur les 8 sites étudiés se situe entre -0,5 % et +6,5 %

La dernière étape réunit le calcul énergétique et l'analyse du fonctionnement du procédé pour calculer les **consommations spécifiques** par postes, et pour étudier les **corrélations** entre les consommations absolues et les variables de fonctionnement.

Toute cette analyse est effectuée au pas de temps journalier, puis synthétisée aux pas de temps mensuel et annuel.

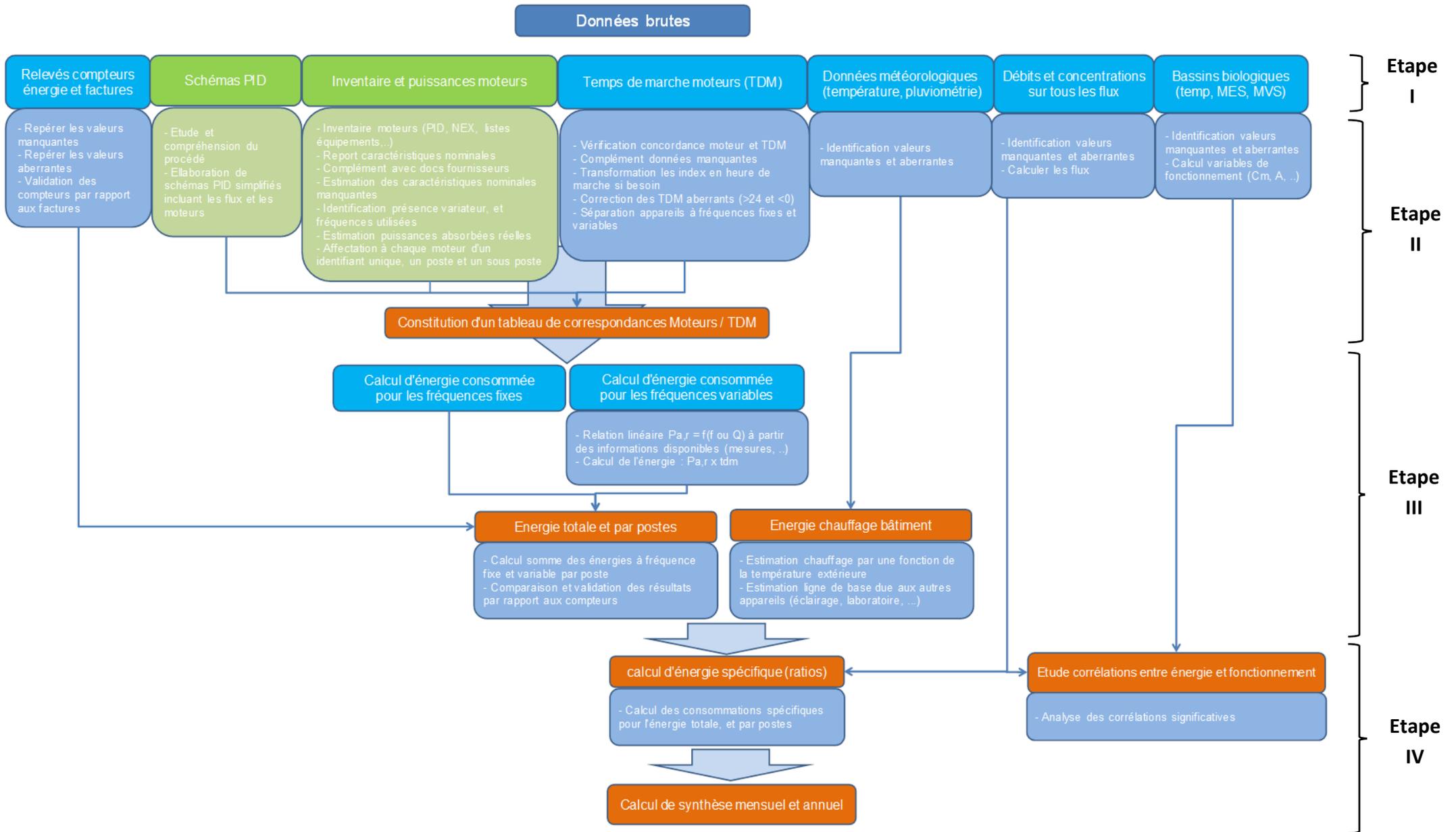


Figure 9 : Schéma de la procédure de calcul et d'analyse de la consommation d'énergie par postes

2.2 Puissances spécifiques installées

Les données descriptives nécessaires pour l'étude des consommations par postes permettent aussi de calculer et d'analyser les puissances spécifiques installées. Il s'agit de la somme des puissances utiles nominales des moteurs ($P_{u,n}$ en W) sur un périmètre donné rapportée à une unité caractérisant la taille du périmètre : capacité nominale (en EH) pour la station entière, et volume utile (en m^3) pour les bassins. Les puissances spécifiques caractérisent donc la conception (degré d'équipements) de l'installation. Il n'y a pas de lien direct avec la consommation d'énergie, puisque la puissance installée de la plupart des moteurs est modulée par un fonctionnement discontinu et/ou par la variation de vitesse. L'agitation mécanique des bassins biologiques fait cependant exception, car elle fonctionne généralement en continu et à la vitesse nominale.

Quel que soit le périmètre considéré, les puissances spécifiques diminuent avec la taille selon une fonction puissance : la relation entre les puissances installées et la taille n'est donc pas linéaire, et les puissances spécifiques installées sur les petits ouvrages peuvent être très élevées sans pour autant être aberrantes. Elles se justifient par les effets d'échelle liés aux facteurs géométriques et hydrodynamiques, mais peuvent aussi résulter de contraintes sur les tailles d'équipements disponibles sur le marché.

Les gammes observées sur les 8 cas étudiés sont résumées par classes de taille dans le Tableau 13. Ces valeurs sont données à titre indicatif, et ne peuvent pas servir de référence étant donné le faible nombre d'observations.

Tableau 13. Gamme de puissances spécifiques installées observées sur les 8 cas étudiés en fonction de la taille des équipements.

Périmètre fonctionnel	Classe de taille	Unité	Gamme observée	Unité
Global	6 - 95	kEH	17 - 36	W/EH
Aération par insufflation d'air	1300 - 8600	m^3	19 - 35	W/ m^3
	70 - 530	m^3	140 - 430	W/ m^3
Agitation mécanique	300 - 6500	m^3	1.5 - 17	W/ m^3
	100 - 150	m^3	12 - 48	W/ m^3
	20 - 40	m^3	63 - 100	W/ m^3

Les **puissances spécifiques globales** dépendent de la taille de l'installation, mais aussi du degré d'équipement, qui traduit d'une part le niveau de traitement requis sur les filières eau, boues et air, et d'autre part le niveau de redondance pour assurer la flexibilité (fractionnement des filières) et la fiabilité (secours).

Les **puissances spécifiques d'aération et d'agitation** dépendent fortement de la taille des bassins. Les données disponibles ne permettent cependant pas de montrer un effet de la forme (annulaire, cylindrique ou rectangulaire). La fonction principale de l'aérateur (transfert d'oxygène dans les bassins d'aération, cisaillement dans les bassins membranaires) ou de l'agitateur (mélange et maintien en suspension de la boue dans les bassins non aérés, circulation horizontale dans les bassins d'aération), ainsi que la concentration de la boue sont probablement aussi des facteurs déterminants sur le choix des puissances installées.

2.3 Consommation absolue par poste et facteur de variation intrasite

Les consommations absolues permettent de suivre les évolutions dans le temps et d'étudier les corrélations avec les variables de fonctionnement au sein d'une installation.

2.3.1 Variations temporelles

Les variations temporelles de la consommation énergétique absolue ont été étudiées sur les 8 installations au pas de temps mensuel et journalier. Les amplitudes de variation de la consommation globale augmentent lorsque l'échelle de temps considérée diminue, et lorsque la taille de la station diminue. On distingue des variations cycliques, avec une périodicité hebdomadaire ou saisonnière, et des variations ponctuelles et aléatoires. L'étude des variations au niveau des sous-postes et de leurs corrélations avec le fonctionnement de la station pointent principalement deux causes : les variations des charges hydrauliques ou organiques à traiter (causes externes), et les opérations discontinues et non automatisées sur la station (causes internes).

Les **variations de charge** sont principalement déterminées par les rejets non domestiques. Les rejets des activités économiques (industries, tourisme) présentent des cycles hebdomadaires (jours ouvrés/week-end) et saisonniers (vacances scolaires, fêtes,...), ainsi que des variations aléatoires (opérations ponctuelles, incidents). Les eaux claires parasites présentent des variations saisonnières (infiltrations de nappe) et aléatoires (précipitations).

Certaines **opérations discontinues** sur la station, en particulier l'extraction et le traitement des boues, sont déterminées par le rythme de travail du personnel d'exploitation, dont les variations hebdomadaires et saisonnières sont d'autant plus marquées que la station est petite. Les autres opérations discontinues sont de nature ponctuelle (maintenance et pannes) et indépendantes de la taille.

2.3.2 Corrélation avec les variables de fonctionnement

L'étude des corrélations entre la consommation d'énergie et les variables de fonctionnement est utile pour interpréter les variations temporelles, et pour identifier les variables sur lesquelles agir pour réduire la consommation.

Le **niveau des sous-postes** est le plus pertinent pour rechercher et interpréter les corrélations. Les tendances identifiées à l'échelle journalière parmi les 8 cas étudiés sont synthétisées dans le Tableau 14. Les variables considérées dans ce tableau sont restreintes à celles qui sont disponibles à la fréquence quotidienne, que ce soit par la mesure (débits) ou l'interpolation (concentrations en boues). En effet, l'étude des corrélations avec des variables mesurées de manière intermittente s'est avérée peu pertinente. C'est en

particulier le cas des charges à traiter sur la filière eau : contrairement aux attentes, un lien avec la consommation de l'aération biologique, et plus largement de la filière eau, n'a pu être montré que dans 2 cas sur 8, qui subissent une variation de charge saisonnière. Une des explications est que les programmes d'échantillonnage ne sont pas assez représentatifs des variations de charge à l'échelle hebdomadaire, et encore moins sur les petites stations.

Lorsqu'elles sont représentées graphiquement, les tendances recensées dans le Tableau 14 présentent une dispersion plus ou moins forte, et sont fréquemment perturbées par des modifications des réglages des asservissements ou des dysfonctionnements d'équipements. Ces perturbations se traduisent par des ruptures de pentes, des décrochements, ou la présence de plusieurs séries plus ou moins parallèles.

Tableau 14. Corrélations observées à l'échelle journalière entre les sous-postes et les variables de fonctionnement sur les 8 cas étudiés

Poste	Sous-poste	Corrélation avec une variable de fonctionnement					Constante par paliers
		Volume eau à traiter	Conc. boues BA	Volume boues à traiter	Masse boues à traiter	Température air extérieur	
EAU	relevage	✓					
	prétraitements	x					x
	bassin tampon	x					
	aération biologique	x	x			x	
	aération membranes	✓					
	agitation BA						✓
	agitation hors BA						✓
	recirculation interne						✓
	recirculation externe	✓					
	pompages divers	x		x			
	décantation						✓
BOUES	extraction			✓			
	épaississement			✓			
	conditionnement chimique			✓			
	déshydratation			✓			
	<i>digestion</i>	<i>sous-poste non observé</i>					
	chaulage				✓		
	<i>séchage solaire</i>	<i>sous-poste non observé</i>					
	séchage thermique				✓		
	<i>incinération</i>	<i>sous-poste non observé</i>					
	stockage				x		
AIR	ventilation			x		x	x
	désodorisation						✓
	chauffage					x	x
	<i>climatisation</i>	<i>sous-poste toujours estimé</i>					
LOCAL EXPLOITATION	chauffage					✓	
	<i>climatisation</i>	<i>sous-poste toujours estimé</i>					
	autres usages						✓

Corrélation identifiée : ✓ dans tous les cas x dans certains cas

Les corrélations deviennent plus complexes et moins identifiables lorsque le périmètre est élargi au **niveau des postes ou de la station**, pour deux raisons :

- les relations au niveau des sous-postes s'additionnent, avec des effets d'amplification, de distorsion, ou de compensation ;
- les variables de fonctionnement déterminantes peuvent être corrélées entre elles.

Les relations résultantes sont donc imprévisibles, et souvent peu marquées. C'est pourquoi aucune tendance systématique entre la consommation globale et les variables de fonctionnement ne peut être dégagée à l'échelle d'une installation.

2.4 Consommation relative par poste et facteurs de variation

Niveau des postes

Les consommations relatives par postes observées à l'échelle annuelle sur les 8 cas étudiés sont synthétisées dans le Tableau 15. Ils n'ont qu'une valeur d'exemple, mais illustrent la diversité des situations que l'on peut rencontrer en fonction des technologies. Le poste Eau est généralement dominant, mais la tendance peut s'inverser au profit du poste Boues en cas de séchage thermique. En l'absence de séchage thermique, la seconde place se joue entre le poste Air (en cas de désodorisation chimique) et le poste Boues (en l'absence de désodorisation), en se situant toujours loin derrière le poste Eau. En cas d'apports externes, le poste Graisses peut peser autant que le poste Boues.

Tableau 15. Consommations relatives par postes (lorsqu'ils existent) observées à l'échelle annuelle sur les 8 cas étudiés

		Gamme observée
Poste	Technologie	Min - max
EAU	BA - sans séchage thermique	80% - 82%
	BA - avec séchage thermique	26%
	SBR	61% - 77%
	BRM	80% - 88%
BOUES	sans séchage thermique	4% - 12%
	avec séchage thermique	70%
AIR	sans désodorisation	1% - 3%
	avec désodorisation	6% - 17%
LOCAL EXPLOITATION		0.6% - 3.5%
DIVERS		0.6% - 6.2%
ERREUR		-0.5% - 6.5%
GRAISSES		1.5% - 8.4%
TERTIAIRE		<i>poste non observé</i>

La hiérarchie des postes au sein d'une même installation est une information décisive pour orienter les actions lors d'une optimisation énergétique. Ce sont bien les résultats annuels qui comptent, mais l'étude des variations temporelles a néanmoins montré que les consommations relatives varient elles aussi. L'amplitude des variations au niveau journalier ou saisonnier dépend entre autres des caractéristiques de la filière boues.

Sous postes de la filière eau

Les consommations relatives observées au sein du poste Eau à l'échelle annuelle sur les 8 cas étudiés sont synthétisées dans le Tableau 16. Ces quelques exemples ne permettent

pas de dégager de tendance, même au sein d'une technologie donnée, mais illustrent la diversité des situations.

Tableau 16. Consommations relatives par sous-postes (lorsqu'ils existent) au sein du poste Eau à l'échelle annuelle sur les 8 cas étudiés

Sous-poste	Gamme observée
	Min - max
relevage	5% - 18%
prétraitements	0.6% - 8%
bassin tampon	5% - 7%
agitation hors BA	1% - 12%
agitation BA	2% - 66%
aération biologique	22% - 80%
aération membranes	23% - 57%
recirculation interne	2% - 3%
recirculation externe	2% - 12%
pompages divers	0.9% - 8%
décantation	0.3% - 4%

Contrairement aux attentes, le sous-poste prépondérant n'est pas toujours l'aération biologique : l'agitation du BA ou l'aération membranaire peuvent dans certains cas aussi se situer au premier rang. Par contre, le regroupement de ces 3 sous-postes, sous l'appellation aération + agitation, devient dominant dans tous les cas (58 % à 88 % du poste Eau).

Sous postes de la filière boues

Pour le poste Boues, on peut dégager quelques tendances en distinguant 3 types de filières (Tableau 17) :

- Pour les filières en **déshydratation directe**, la déshydratation est au premier rang. Le second rang se joue entre l'extraction et le stockage.
- Pour les filières avec **épaississement préalable**, la part relative de la déshydratation diminue, et peut être surpassée par celle de l'épaississement (cas d'une flottation) ou du stockage.
- Enfin, pour le seul cas observé de filière avec **séchage thermique**, ce sous-poste domine très largement tous les autres.

Tableau 17. Consommations relatives par sous-postes (lorsqu'ils existent) au sein du poste Boues à l'échelle annuelle sur les 8 cas étudiés

	Gamme observée		Cas unique
	Déshydratation directe	Déshydratation après épaissement	Séchage thermique
Sous-poste	Min - max	Min - max	
extraction	1% - 7%	2% - 14%	0.2%
épaissement	-	1% - 40%	1.6%
conditionnement chimique	1% - 5%	7% - 22%	0.4%
déshydratation	70% - 87%	23% - 60%	1.0%
<i>digestion</i>	<i>sous-poste non observé</i>		
chaulage	1% - 4%	-	-
<i>séchage solaire</i>	<i>sous-poste non observé</i>		
séchage thermique	-	-	96%
<i>incinération</i>	<i>sous-poste non observé</i>		
stockage	2% - 27%	16% - 39%	1.0%

Un point à retenir est que la part du stockage (intermédiaire et final) n'est souvent pas négligeable (16 % à 39 % dans 5 cas sur 8), et qu'elle augmente avec la complexité de la filière boues (nombre d'étages).

Sous-postes de la filière Air

Les données souvent lacunaires sur ce poste n'ont permis de connaître la répartition par sous-postes que dans la moitié des cas analysés. Là encore, les situations sont diversifiées. La désodorisation peut être le sous-poste prépondérant lorsqu'elle est chimique, mais si elle est optimisée, elle peut se placer derrière la régulation thermique des locaux techniques (chauffage et climatisation).

Sous-postes du Local d'exploitation

La répartition n'est connue de manière fiable que sur un seul cas, qui n'est cependant pas très représentatif puisqu'il s'agit d'un bâtiment récent et certifié HQE. Dans les 7 autres cas, les sous-postes ont été estimés (Tableau 18).

Le chauffage représenterait au moins 40% du poste, tandis que la climatisation, lorsqu'elle existe, resterait faible en comparaison. Les autres usages peuvent cependant occuper une place équivalente voire supérieure à celle du chauffage.

Tableau 18. Consommations relatives par sous-postes (lorsqu'ils existent) au sein du poste Local d'exploitation à l'échelle annuelle sur les 8 cas étudiés

	Cas unique	Gamme
	Selon mesure	Selon estimations
Sous-poste		Min - max
autres usages	53%	16% - 56%
chauffage	47%	40% - 73%
climatisation	-	4% - 15%

2.5 Consommation spécifique par poste et comparaison aux valeurs de référence bibliographiques

Les consommations spécifiques par postes permettent de comparer les installations entre elles et à des références. Le Tableau 19 résume les valeurs observées sur les 8 cas étudiés en fonction des technologies employées, et les compare aux gammes usuelles des valeurs bibliographiques compilées à ce jour (cf. Annexe 16). Les références françaises trouvées concernent uniquement les sous-postes de la filière boues, tandis que les valeurs sur l'aération biologique sont d'origine allemande.

Tableau 19. Consommations spécifiques par (sous-)postes observées sur les 8 cas étudiés et rapportées dans la bibliographie technique française ou allemande

Poste	Sous-poste	Technologie	Type d'énergie	Unité	Gamme observée Min - Max	Gamme usuelle bibliographie	
EAU	Aération biologique		Electrique	kWh/kgDCO élm	0.40 - 0.73	0.24 - 0.97	
	Aération + agitation	BA	Electrique	kWh/kgDCO élm	0.55 - 0.72		
		SBR	Electrique	kWh/kgDCO élm	0.72 - 1.60		
		BRM	Electrique	kWh/kgDCO élm	1.11 - 1.36		
BOUES	Epaississement	Gravitaire hersé	Electrique	kWh/tMS		5 - 10	
		Egouttage dynamique	Electrique	kWh/tMS	16 - 22	25 - 60	
		Flottation	Electrique	kWh/tMS	83	100 - 130	
		Centrifugation	Electrique	kWh/tMS	131 - 560*	150 - 200	
	Déshydratation (après épaississement)	Filtre à bande	Electrique	kWh/tMS		10 - 40	
		Filtre à plateaux	Electrique	kWh/tMS	64	30 - 40	
		Centrifugation	Electrique	kWh/tMS	50 - 74	60 - 80	
	Digestion	Stabilisation aérobie	Electrique	kWh/tMS		330 - 500	
		Digestion anaérobie mésophile	Electrique	kWh/tMS		50 - 100	
			Thermique	kWh/tMS		35 - 40	
	Chaulage		Electrique	kWh/tMS	4 - 6	5	
	Séchage solaire	Serre ouverte		kWh/t eau evp		30 - 70	
		Serre fermée ventilée		kWh/t eau evp		70 - 100	
		Serre fermée désodorisée		kWh/t eau evp		100 - 1000	
		Serre fermée plancher chauffant ventilée		kWh/t eau evp		150 - 250	
		Serre fermée plancher chauffant désodorisée		kWh/t eau evp		250 - 1100	
	Séchage thermique		Thermique	kWh/t eau evp	1 327	850 - 1100	
		Sans pelletisation	Electrique	kWh/t eau evp	84	60 - 65	
		Avec pelletisation	Electrique	kWh/t eau evp		100 - 110	
Incinération	Boues non autocombustibles	Thermique	kWh/tMS		740 - 950		
		Electrique	kWh/tMS		265		
LOCAL EXPLOITATION						55 - 403	100 - 185

* valeurs observées sur les filières avec centrifugation en déshydratation directe (sans épaississement)

Tout comme à l'échelle globale, les consommations spécifiques par (sous-)postes sont plutôt dispersées, que ce soit dans l'étude ou la bibliographie, et cette variabilité peut être reliée à des variables explicatives. Le nombre de cas analysés dans l'étude ($n_{obs} = 8$) est trop faible pour pouvoir identifier les facteurs de variation de manière systématique, mais le cas de la centrifugation permet par exemple de montrer que la concentration de la boue entrante est une variable déterminante sur sa consommation spécifique. Lorsque la concentration augmente, le volume de boue à traiter par unité de masse diminue, donc la consommation en kWh/t MS diminue. C'est pourquoi la bibliographie indique que la consommation spécifique de la centrifugation appliquée à l'épaississement est significativement supérieure à celle appliquée en déshydratation sur de la boue épaissie (Tableau 19). Dans l'étude, la centrifugation était appliquée à la déshydratation dans tous les cas, mais la consommation spécifique observée sur les filières en déshydratation directe

rejoint les valeurs rapportées pour l'épaississement, tandis que la consommation observée après épaississement est cohérente avec la gamme rapportée pour la déshydratation.

Les valeurs obtenues sur les 8 cas étudiés se situent le plus souvent dans les gammes de la bibliographie. Dans le cas contraire, les écarts peuvent s'expliquer par :

- des différences méthodologiques entre la bibliographie et l'étude, en particulier sur les périmètres des sous-postes. Par exemple, les valeurs sur l'égouttage dynamique observées dans l'étude apparaissent faibles, car elles n'incluent pas les dépenses pour l'injection des réactifs (affectées au sous-poste conditionnement chimique), ni pour le lavage des équipements (poste Divers).
- des conditions de fonctionnement non optimales ou atypiques parmi les cas étudiés. Par exemple, la centrifugeuse qui affiche une consommation spécifique de 560 kWh/tMS en déshydratation directe est alimentée avec une boue très diluée (1,4 gMES/L).
- une technologie particulièrement économe ou énergivore parmi les cas étudiés. Par exemple, le seul cas de séchage thermique observé repose sur une conception ancienne et sans récupération de chaleur, ce qui pourrait expliquer ses mauvaises performances. A l'inverse, le local d'exploitation qui apparaît économe avec 55 kWh/(m².an) est récent et certifié HQE.

Chapitre 3. Application aux stations d'épuration existantes

3.1 Démarche d'audit énergétique d'une installation existante

Toute installation peut *a priori* être optimisée sur le plan énergétique, avec un gain variable d'un site à l'autre. La démarche d'audit proposée intègre les enseignements et outils issus des deux premiers chapitres de ce rapport.

La première étape consiste à évaluer la **consommation globale** de la station, afin de déterminer l'importance de procéder à une optimisation énergétique.

La seconde étape consiste à identifier et quantifier les pistes de gain.

3.1.1 Détermination de la marge d'optimisation

La première partie de ce travail a démontré et expliqué la forte variabilité des consommations énergétiques spécifiques observées sur les 5 procédés intensifs étudiés. Devant ces constats, il serait **inapproprié de retenir une consommation de référence unique par procédé**, telle qu'une valeur médiane ou moyenne. Au contraire, l'intérêt des modèles est de pouvoir prédire une **consommation de référence individualisée pour chaque installation**. Cette valeur représente la **consommation moyenne des installations du parc français qui auraient les mêmes caractéristiques déterminantes de conception et de fonctionnement que l'installation considérée**.

Les modèles multivariés développés pour les procédés BA, BRM et BF sont utiles dans une démarche d'optimisation énergétique, puisqu'ils permettent :

- d'expliquer une consommation énergétique globale observée sur une station ;
- de prédire une consommation énergétique de référence en fonction des caractéristiques de conception et de fonctionnement de chaque station ;
- dans certains cas, d'estimer la marge d'économie globale potentielle.

Ces modèles sont accessibles sous la forme d'une application web disponible au lien suivant : <https://energie-step.irstea.fr/>.

Pour les procédés SBR et MBBR, seule une analyse graphique est possible et permet d'expliquer une consommation énergétique globale sur une station.

Le **choix du référentiel** pour la charge organique reste à trancher. L'analyse uni- et bi-variée a suggéré à plusieurs reprises que la DBO_5 est une variable moins fiable que la DCO, mais les conclusions de l'analyse multivariée sont plus nuancées. En effet, la qualité d'ajustement et la validité des modèles n'est pas toujours meilleure dans le référentiel DCO. A ce stade, il est impossible de recommander l'un ou l'autre référentiel. Pour l'application à

une installation donnée, il faudra donc comparer les deux résultats. Un choix *a priori* ne se justifie que si on dispose d'éléments indiquant que l'un des deux paramètres est d'emblée plus fiable que l'autre, par exemple grâce à une fréquence ou une qualité d'analyses supérieure.

Comme il s'agit de modélisation statistique, cette moyenne est assortie d'un *intervalle de prédiction* à 95 % (IP95). L'écart entre Y observé et prédit représente la variabilité résiduelle, c.à.d. la part de la consommation non expliquée par les modèles. Elle regroupe l'effet des variables explicatives non considérées dans le modèle et les erreurs de mesure.

La largeur de l'intervalle dépend en principe des valeurs des variables explicatives. Pour simplifier, elle peut être estimée par une constante propre à chaque modèle, donnée dans le Tableau 20.

Tableau 20. Intervalles de prédiction à 95 % estimés pour les 18 modèles développés

	Référentiel DCO			Référentiel DBO5		
	Ytot kWh/j	Ytot_DCO kWh/kgDCO élém	Ytot_V kWh/m3 traité	Ytot kWh/j	Ytot_DBO kWh/kgDCO élém	Ytot_V kWh/m3 traité
BA	-31% / +46%	+/- 0.49	+/- 0.28	-31% / +45%	+/- 1.16	-31% / +44%
BRM	-8% / +9%	+/- 0.43	+/- 0.27	-15% / +17%	-18% / +23%	+/- 0.30
BF	-39% / +63%	+/- 0.78	-32% / +48%	-40% / +66%	+/- 2.23	-29% / +42%

Application à une station existante

En comparant la consommation observée et prédite, trois cas peuvent se présenter, tels qu'illustrés par la Figure 10 :

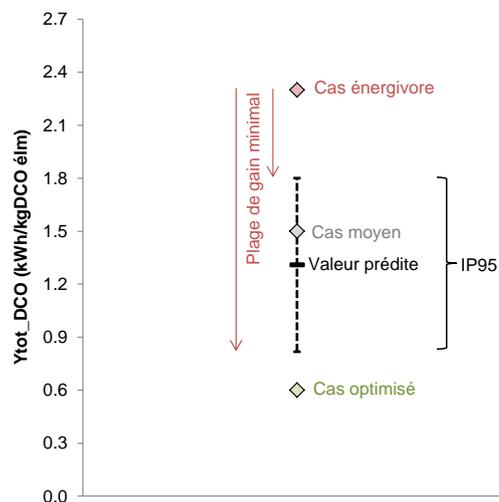


Figure 10. Comparaison d'une consommation observée à la consommation de référence prédite

Si la consommation observée se situe **dans l'intervalle de prédiction**, l'installation évaluée se situe **dans la moyenne du parc français**. Ceci ne veut pas dire pour autant qu'il n'existe pas de marge d'optimisation énergétique, puisque le parc actuel est loin d'être optimisé. Mais les modèles ne seront d'aucune aide pour la quantifier. Il faudra alors

effectuer une analyse approfondie des consommations par postes (cf. Chapitre 2), et évaluer puis additionner les gains envisageables par opération unitaire ou par équipement.

Si la consommation observée se situe **en dehors de l'intervalle de prédiction**, cela fait de la station un **cas extrême**. Le premier réflexe sera d'aller re-vérifier en détail les données utilisées et les calculs effectués. Si le résultat observé est confirmé :

- Si la consommation se situe **au-dessus de la limite supérieure de prédiction**, on peut qualifier l'installation évaluée d'énergivore. Il s'agit alors d'en rechercher les causes, parmi tous les aspects non pris en compte dans les modèles. La marge d'économie minimale est alors encadrée par les différences entre la valeur observée et les deux limites de l'intervalle de prédiction.
- Si la consommation se situe **au-dessous de la limite inférieure de prédiction**, on peut qualifier l'installation évaluée d'optimisée par rapport aux valeurs moyennes du parc français. Ceci ne veut pas dire pour autant qu'il n'existe plus de marge de gain énergétique, mais les modèles ne seront d'aucune aide pour la quantifier. Si la démarche d'optimisation doit être poursuivie, une analyse par postes permettra d'identifier ceux qui sont déjà optimisés, et les marges de gain restantes sur les autres.

La Figure 11 illustre le cas de deux BA :

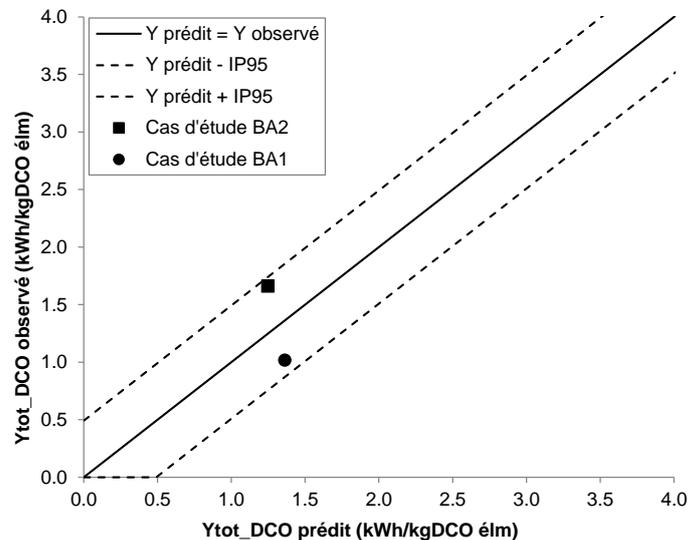


Figure 11. Comparaison de la consommation Y_{tot_DCO} observée à la consommation de référence prédite pour deux BA étudiées

Les deux cas se situent dans l'intervalle de prédiction, et présentent donc une consommation dans la moyenne. Cependant, leur proximité avec les limites de prédiction permet de dégager par extrapolation des tendances plus intéressantes. La position de BA2 à la limite supérieure de l'IP95 reflète une tendance plutôt énergivore pour ses conditions de fonctionnement, et un potentiel de gain minimum de 0 à 0,9 kWh/kgDCO_{él(m)}. A l'inverse, la position de BA1 à la limite inférieure de l'IP95 traduit une situation plutôt optimisée. Malgré

tout, son audit énergétique montrera l'existence d'un potentiel d'économie supplémentaire d'au moins 24 % sur la consommation globale.

3.1.2 Identification des pistes de gain

La seconde étape consiste à identifier et quantifier les pistes de gain. Pour cela, il convient de déterminer les **consommations par postes et sous postes**. La méthodologie de calcul est explicitée dans la section 2.1.

La **consommation absolue** par (sous)-postes sera calculée au pas de temps mensuel ou journalier, afin d'étudier ses variations en relation avec les paramètres de fonctionnement de l'installation. Ceci permet d'identifier les variables de fonctionnement qui ont un impact sur la consommation énergétique, et de définir des actions sur les variables qui sont maîtrisables, soit rapidement en exploitation courante, soit à plus long terme après travaux. La **consommation spécifique** par (sous)-postes sera calculée au pas de temps annuel, et comparée aux valeurs de référence issues de la bibliographie pour des technologies et des périmètres comparables. Ceci permet de vérifier s'il existe un potentiel d'optimisation de la technologie en place, et d'estimer le gain possible avec un changement de technologie. Enfin, la **consommation relative** par (sous)-postes sera calculée au pas de temps annuel, afin de définir les postes à cibler pour maximiser le gain sur la consommation globale, et d'évaluer l'impact global des gains envisageables par (sous)-poste.

Cette étape est complétée par une **analyse technico-économique** des actions proposées sur la base d'un ensemble de critères qu'il faudra définir et pondérer, puis de classer les actions par ordre de priorité.

La mise en œuvre des actions doit être accompagnée d'une **évaluation** de leur incidence sur la consommation énergétique des sous-postes concernés et sur la consommation globale. Le suivi au niveau des sous-postes sera assuré soit par des compteurs divisionnaires judicieusement installés et calés, soit par le calcul.

3.2 Recommandations aux acteurs de l'assainissement en France

Les phases de programmation, de conception et d'exploitation d'une station d'épuration doivent intégrer et concilier un ensemble de critères d'ordre technique, économique, réglementaire, environnemental, humain, etc... **La première recommandation à l'attention des différents acteurs de l'assainissement collectif en France (services de l'état, organismes financeurs, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, constructeurs, et exploitants) sera évidemment d'inclure la consommation d'énergie dans les critères à considérer à toutes les étapes du projet.** Un ensemble d'actions ciblées peut être proposé à

partir des enseignements de cette étude. Cependant, si les actions visant à économiser l'énergie ou à en produire sur site ont un effet direct et bénéfique attendu sur la facture d'énergie et sur les émissions liées à sa production, elles peuvent aussi avoir des répercussions indirectes (positives ou négatives) dans d'autres domaines (coûts d'investissement, de maintenance, ou de personnel ; émissions directes vers les compartiments eau, sol, et air,...). Il reste donc indispensable de procéder à une analyse multicritères pour chaque action envisagée dans le contexte du cas étudié.

3.2.1 Introduire le critère « consommation énergétique » dans les performances de la station

La performance énergétique d'une station devrait faire partie de critères de jugement des performances de la station. Des objectifs d'optimisation peuvent être fixés. Pour cela, il convient de mieux connaître les consommations y compris par (sous-)poste.

Un système de suivi de la consommation globale et par postes doit donc être prévu dès la conception, et comprendra au minimum :

- des compteurs d'énergie électrique et combustible installés sur le périmètre global et sur les (sous-)postes. L'architecture des compteurs divisionnaires doit être bien définie et cohérente, pour permettre de répondre aux enjeux et d'effectuer des vérifications croisées (validation). Chaque compteur doit correspondre à une liste d'équipements définie, et être calé après installation.
- un report de l'information brute en supervision, et des procédures automatisées pour la validation des données et le calcul d'indicateurs ;
- des alertes en cas d'échec de la validation des données, et de dérive des indicateurs par rapport à des seuils, des objectifs, ou à un historique ;
- l'enregistrement et l'archivage des données.

Par ailleurs, l'acquisition de données en continu sur le fonctionnement de l'installation (charges et caractéristiques des eaux usées, température et concentration des boues, données météorologiques, ...) et de chaque équipement (TDM, fréquences, débits, réglages) est souhaitable, car l'exploitation de ces historiques en différé permet d'effectuer des audits énergétiques détaillés et de faire progresser les connaissances.

Il conviendra aussi à une fréquence donnée de comparer à l'échelle de la journée la consommation totale de la station par les différents compteurs divisionnaires et le relevé du compteur général du distributeur d'énergie, éventuellement de reporter cette donnée en supervision.

3.2.2 Lutte contre le surdimensionnement

Le surdimensionnement concerne à la fois les ouvrages (capacité nominale de traitement) et les équipements (puissance nominale installée). Il a des conséquences directes sur les coûts d'investissement, mais aussi sur ceux d'exploitation, dont la consommation d'énergie. En effet, le surdimensionnement implique un fonctionnement en sous-charge en moyenne annuelle, qui est un facteur majeur de dégradation des performances énergétiques des installations (taux de charge organique et hydraulique) et des équipements (taux de charge mécanique).

3.2.2.1 Surdimensionnement des ouvrages

La moitié des stations d'épuration de l'échantillon français étudié reçoivent moins de 47 % de leur capacité nominale en DBO₅ en moyenne annuelle, et moins de 60 % dans $\frac{3}{4}$ des cas (cf. Tableau 29 en Annexe 4). Ces faibles taux de charge sont le premier facteur explicatif des consommations spécifiques élevées du parc français. Ils sont en partie dus à la démarche de dimensionnement française, sur la base de la semaine la plus chargée et sur des réseaux plutôt unitaires. Le ratio entre la charge maximale hebdomadaire et la charge moyenne annuelle est amplifié sur les réseaux unitaires, ce qui tend à réduire les taux de charge moyens sur ce type de réseau. D'autres facteurs aggravants sont les variations de charge d'origine touristique ou industrielle, et des hypothèses trop optimistes sur l'évolution de la démographie et du taux de collecte de la collectivité.

Ce constat milite en faveur des **réseaux d'assainissement séparatifs** et de **l'échelonnement des capacités de traitement** dans le temps. En effet, une construction des stations d'épuration par tranches, telle qu'elle est déjà pratiquée dans d'autres pays, permettrait d'adapter la capacité disponible aux évolutions de la charge entrante, et ainsi de maintenir un taux de charge plus élevé et plus stable. Il reste impératif de réserver le foncier correspondant à l'emprise au sol envisagée à terme, mais le dimensionnement des ouvrages peut s'étudier par étapes, avec une appréciation la plus réaliste possible de l'évolution des différents rejets de la collectivité (domestiques, industriels, touristiques, et eaux claires parasites).

3.2.2.2 Surdimensionnement des équipements

L'étude a montré que les moteurs de la plupart des équipements des stations d'épuration fonctionnent aussi en sous-charge mécanique. D'une part, la puissance mécanique requise sur l'élément entraîné (roue de pompe, hélice de ventilateur ou de compresseur,...) est très souvent inférieure à sa puissance utile nominale, qui a été dimensionné pour la pointe ; et d'autre part, la puissance utile nominale du moteur est majorée par rapport à celle de l'élément entraîné (facteur de sécurité minimal de 15 % imposé par le CCTG, à l'exception des pompes immergées).

Lors de la conception, les efforts devraient donc porter sur une estimation plus fine des puissances mécaniques nécessaires, la réduction des coefficients de sécurité à tous les niveaux, et l'étude de l'opportunité de fractionner la puissance totale à installer sur plusieurs équipements en parallèle.

3.2.3 Adaptation à la sous-charge

Un fonctionnement en sous-charge ne pourra être totalement évité, puisqu'il faut assurer la fiabilité du traitement en tout temps face aux fluctuations de la charge et des autres variables. Il est néanmoins possible d'adapter l'exploitation de la station à la sous-charge selon trois axes, si cela a été prévu dès la conception :

La **modularité des filières**, qui est primordiale en cas de charge variable saisonnière, consiste à fractionner la capacité totale sur plusieurs files de traitement parallèles, et à autoriser le by-pass total ou partiel de certains ouvrages, tels que les décanteurs primaires ou les zones d'anoxie.

La **flexibilité des équipements** consiste à fractionner la puissance totale à installer sur plusieurs équipements, et à intégrer la vitesse variable et des automatismes. La variation de vitesse ne représente cependant pas une réponse universelle à toutes les situations de sous-charge, car elle présente aussi des inconvénients et des limites. Ses effets néfastes peuvent concerner le moteur (chute du rendement, dommages physiques), mais aussi se propager à tout le réseau électrique via la production et la propagation d'harmoniques. Il faut donc préférer des systèmes variateur-moteur intégrés dès la conception à l'ajout d'un variateur sur un moteur non conçu à cet effet, respecter les plages optimales de fréquence, et prévoir des systèmes de lutte contre les harmoniques (filtrage, compensation,...).

Pour les cultures libres, l'adaptation à la sous-charge passe aussi par la **réduction de la concentration en boue** dans les bassins biologiques, afin de maintenir la charge massique maximale permettant d'atteindre les objectifs de traitement, tout en réduisant la demande en oxygène et en améliorant son transfert. Cette stratégie a néanmoins des conséquences jusque sur la filière boues : la concentration de la boue extraite est aussi réduite, et le volume à traiter augmente, ce qui peut dégrader les performances du premier étage de la filière en termes de traitement et d'énergie, surtout s'il s'agit d'une déshydratation directe. La parade est alors de prévoir dès la conception un **pré-épaississement dynamique** en tête de la filière boue.

Le rôle de l'exploitant sera de mettre à profit toutes les solutions mises à disposition pour faire face à la sous-charge de l'installation, et à anticiper les montées et les baisses de charge en cas de variation saisonnière.

3.2.4 Lutte contre la dilution des eaux usées

La moitié des stations de l'échantillon français étudié reçoivent des eaux usées affichant une concentration moyenne annuelle inférieure à 220 mgDBO₅/L, et à 285 mg/L dans ¾ des cas (cf. Tableau 29 en Annexe 4). Or la dilution est le second facteur explicatif des consommations spécifiques élevées du parc français. Ce point doit être traité en amont des stations de traitement, en **favorisant les réseaux d'assainissement séparatifs**, et en **luttant contre les eaux claires parasites** (ECP) par des actions d'entretien et de réhabilitation des

réseaux. Ces deux mesures contribuent également à réduire le surdimensionnement et la sous-charge des installations de traitement, et ainsi à limiter leur consommation énergétique et, plus largement, leurs coûts d'investissement et d'exploitation.

3.2.5 Choix des procédés et des technologies

Le choix du procédé de traitement est typiquement un exercice d'optimisation multicritères. Il s'agit de répondre à tous les objectifs du cahier des charges (charges à traiter, niveau de traitement, contraintes spécifiques locales,...), tout en maîtrisant les coûts financiers et énergétiques. Par contre, les effets de mode et les arguments commerciaux ne devraient pas influencer les décisions. En particulier, les technologies innovantes (SBR, BRM, MBBR), dont l'étude a montré qu'elles sont plus énergivores, ne devraient être envisagées que si que les technologies traditionnelles (BA ou BF) ne peuvent pas répondre à l'ensemble des contraintes imposées. Par exemple, le choix d'un BRM devrait être justifié par un contexte particulier combinant au minimum une exigence de traitement poussé (fiabilité renforcée, haute qualité physico-chimique et microbiologique, réutilisation de l'eau traitée,...) et une exigence de compacité (contraintes foncières ou paysagères,...). Quoiqu'il en soit, les consommations énergétiques supérieures pour les procédés innovants s'expliquent aussi par un moindre recul sur le fonctionnement de ces installations et une procédure d'optimisation qui reste encore à mener.

3.2.6 Choix des équipements

Les performances énergétiques (rendements du moteur, rendement global,...) devraient faire partie des critères de sélection des équipements lors de la conception, en étudiant la possibilité de dépasser ou devancer les normes d'efficacité énergétique en cours de validité. Il s'agit non seulement de maximiser les performances en conditions nominales, mais également en sous-charge.

En exploitation, chaque renouvellement d'équipement doit être l'occasion de réévaluer la puissance à installer (à la hausse ou à la baisse) pour répondre aux besoins réels, et de choisir du matériel plus performant en profitant des évolutions techniques et réglementaires.

3.2.7 Automatisation

L'automatisation est préférable au mode manuel pour optimiser à la fois la qualité du traitement et la consommation d'énergie, car elle permet de s'adapter en temps réel aux variations des conditions de fonctionnement (charges à traiter, température,...). L'asservissement ou la régulation d'un maximum de fonctions doivent donc être prévus dès la conception, en attachant une importance particulière aux (sous-)postes les plus

consommateurs (aération + agitation, pompage, désodorisation, chauffage des bâtiments,...).

Les performances d'un système de régulation en exploitation dépendront entre autres de l'équipement en capteurs (emplacement, robustesse, justesse, fiabilité,..). La poursuite du développement des capteurs pour améliorer leur fiabilité, faciliter leur entretien, et réduire leurs coûts d'achat et de maintenance est donc également souhaitable. Les réglages initiaux effectués lors de la mise en route devront considérer les performances énergétiques et pas seulement celles de traitement.

Le rôle de l'exploitant sera ensuite de mettre à profit toutes les solutions d'automatisation mises à disposition, d'entretenir et de renouveler les capteurs, et d'optimiser les réglages.

3.2.8 Optimisation hydraulique et hydrodynamique

L'étude a montré que le relevage en tête représente usuellement entre 5 % et 12 % de la consommation du poste Eau, et jusqu'à 18% pour des eaux très diluées ou un double relevage entrée - sortie (Tableau 16). Si plusieurs terrains sont disponibles en vue de construire une nouvelle station d'épuration, l'impact de la localisation sur la hauteur de relevage en entrée et sur la nécessité d'un refoulement en sortie devra être considéré parmi les critères de sélection du lieu d'implantation. Ensuite, la conception devra étudier le profil hydraulique de l'installation, afin de minimiser les hauteurs et les distances de pompage entre les ouvrages. Les pertes de charge dans les circuits devront également être étudiées et minimisées (nombre et formes des singularités, diamètres des canalisations,...).

3.2.9 Maintenance des moteurs et des équipements

La maintenance des moteurs (graissage, rebobinage, remplacement des pièces d'usure,...) et des éléments mécaniques (débouchage des pompes, usinage et remplacement des roues,...) contribue non seulement à réduire la fréquence des pannes et à prolonger la durée de vie des équipements, mais aussi à ralentir la dégradation de leurs performances énergétiques. Pour les compresseurs et surpresseurs, le nettoyage régulier des filtres d'aspiration des entrées d'air contribue à maîtriser la dérive des pertes de charge sur le circuit de distribution d'air. A l'autre extrémité du circuit, l'encrassement progressif des diffuseurs est également une cause majeure de dérive des pertes de charge. On peut y remédier par des opérations de décolmatage ou de remplacement des diffuseurs. Le suivi des pertes de charge par un relevé régulier des pressions sur le circuit d'air est indispensable pour programmer cette opération lourde et couteuse au moment opportun.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Ce travail repose principalement sur la collecte et l'analyse de données sur des échantillons de stations d'épuration françaises. En parallèle, des données bibliographiques ont été recherchées et synthétisées pour disposer d'éléments de comparaison. Ainsi, la **consommation globale** de 5 procédés de traitement intensifs (BA, SBR, BRM, BF, MBBR) a été étudiée à partir des rapports annuels de plus de 300 installations françaises de plus de 2 000 EH. La Figure 6 met ainsi en évidence les différences entre procédés. La BA apparaît comme le procédé le plus économe, tandis que le MBBR et le BRM sont les plus énergivores. Ces différences sont attribuables en partie au procédé secondaire lui-même (facteurs intrinsèques), mais aussi aux contraintes de conception et aux conditions de fonctionnement qui caractérisent chaque procédé (facteurs externes).

L'un des objectifs de ce travail était également de proposer des valeurs de référence pour les consommations énergétiques spécifiques en France. Pour la consommation globale, les données de terrain analysées permettent effectivement de proposer des références par procédé, et même par installation pour les procédés BA, BRM et BF (modèle numérique).

Le Tableau 21 recense et hiérarchise les principales variables explicatives apparaissant déterminantes sur la consommation spécifique rapportée à la DBO₅ éliminée pour les 5 procédés étudiés. Le sens de l'effet sur la consommation est indiqué par des flèches pour les variables quantitatives, et par un classement des modalités pour les variables qualitatives. Les résultats apparaissant en gris ont été obtenus dans des conditions peu satisfaisantes au niveau méthodologique.

Tableau 21. Principales variables explicatives déterminantes sur Ytot_DBO pour chaque procédé secondaire en France

		Ytot_DBO							
		Analyse multivariée exploratoire						Analyse bi-variée exploratoire	
		robuste		exploratoire		exploratoire			
		BA		BRM		BF		SBR	MBBR
		Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Rang	Sens	Sens
Géographie	Température air	↗	5						
Caractéristiques eaux usées	Concentration DBO5	↘↘	2	↘	2				
	DBO5/MES	↗↘	6						
	DBO5/NTK	↘	3					↘	
	NTK/PT							↗	
Charge filière eau	Taux de charge DBO5	↘	1	↘	1	↘	1		
Performances filière eau	Rendement NTK					↗	2		
Performances filière boues	Séchage	SEC > ABS	4						
Conception	Membranes			FC > MP	3				

Pour les BA, BRM et SBR, la première variable déterminante **est le taux de charge organique de l'installation**, avec un effet décroissant. On trouve ensuite la concentration en

DBO₅ de l'eau usée pour les BA et BRM, tandis que les BF apparaissent plutôt sensibles au rendement en NTK, qui reflète leur niveau de nitrification. Pour les BA, l'impact de la charge à nitrifier arrive au troisième rang, à travers le ratio DBO₅/NTK de l'eau usée. Pour les BA, la déshydratation poussée des boues par séchage ou incinération pour obtenir une siccité > 35 % pèse sur la consommation énergétique globale. Pour les BRM, l'emploi de fibres creuses se démarque légèrement des membranes planes.

En comparaison avec les données étrangères, l'étude révèle que le parc de stations d'épuration français peut-être optimisé d'un point de vue énergétique, tout en respectant la qualité de traitement demandée au niveau européen et local. La maîtrise de la consommation énergétique du traitement est une préoccupation relativement récente en France, et les outils de suivi de la consommation en supervision ne sont pas encore suffisamment développés, alors qu'ils sont indispensables pour sensibiliser et alerter l'exploitant.

Le plan climat-énergie européen de 2008 et les directives européennes adoptées dans ce cadre visaient à atteindre les objectifs « 3 x 20 » d'ici à 2020, à savoir réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20 % (par rapport aux niveaux de 1990); améliorer l'efficacité énergétique de 20 %; et porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie de l'UE. Ces objectifs ont été portés à 40 %, 27 % et 27 % respectivement d'ici à 2030 dans le paquet climat-énergie de 2014, mais sa traduction dans la réglementation n'est pas encore effective. Les stations d'épuration présentent non seulement un potentiel d'optimisation énergétique et de réduction de leurs émissions de GES, mais aussi un potentiel de production d'énergie renouvelable par la digestion anaérobie des boues. Une (faible) fraction du biogaz produit est réutilisable sous forme de chaleur pour les besoins propres des stations. L'excédent est valorisable par différentes voies, dont la cogénération (chaleur + électricité), l'injection dans le réseau de gaz naturel, ou l'alimentation de véhicules (carburant).

Perspectives

Le chapitre 1 montre que l'une des limites de l'approche statistique est le nombre restreint de données dans les bases françaises et bibliographiques, malgré un travail considérable de collecte et de traitement préliminaire (mise en forme, validation,...) de l'information. Une première perspective serait donc de compléter les deux bases **en ajoutant à la fois des données et des variables**, afin de :

- compléter l'identification des variables déterminantes sur la consommation d'énergie ;
- améliorer la robustesse, la validité et la qualité d'ajustement des modèles ;
- approfondir les explications des écarts observés entre procédés, et entre la France et l'étranger.

Deux objectifs peuvent être recherchés :

- Ajout de nouvelles données préférentiellement pour les procédés SBR et MBBR pour lesquels la dizaine d'observations disponibles à ce stade a sérieusement limité les analyses et la production de connaissances.
- Ajout de variables : le Tableau 22 propose à partir des enseignements de cette étude une liste de variables candidates pour la base française, sans prétendre à l'exhaustivité. L'accessibilité de ces variables reste néanmoins un verrou, qu'il faudra vaincre avec une approche originale et des moyens humains conséquents.

Tableau 22. Variables proposées pour compléter la base de données française

	BA	SBR	BRM	BF	MBBR
Géographie	Température moyenne de l'air, mesurée sur site et sur l'année considérée				
Conception	Présence/absence d'un bassin tampon			Type de support	Taux de remplissage
Fonctionnement filiale eau	Mode de régulation de l'aération				
	Concentration moyenne en boue dans le bassin d'aération				
	Nombre de files en service	Taux d'utilisation des membranes			

Par ailleurs, l'étude s'est limitée aux indicateurs de consommations spécifiques traditionnels, qui rapportent la consommation à la charge en C éliminée et au volume traité. D'autres unités fonctionnelles seraient probablement intéressantes, telles que la charge en NTK éliminée ou la compacité de l'installation (qui reste à définir et à acquérir...). Des indicateurs plus complexes, qui déduiraient la part de la puissance ou de l'énergie expliquée par les variables de conception et/ou de fonctionnement de l'installation, permettraient d'accéder plus directement à la performance énergétique intrinsèque, de réduire la dispersion des résultats, et de comparer directement des stations entre elles.

Enfin, la méthodologie de calcul des consommations par (sous-)poste mise au point au cours de l'étude reste délicate à mettre en œuvre. Sa diffusion et son application à une échelle plus large pourra être favorisée en apportant des améliorations et corrections dans deux directions : réduire le temps et les efforts à investir dans la démarche ; et réduire l'incertitude, fiabiliser les résultats et faciliter leur interprétation. Les pistes incluent :

- Développer une méthode pour estimer les puissances absorbées réelles des moteurs équipés de variateurs en l'absence de mesures.
- Revoir la méthode d'estimation de la consommation des locaux techniques et du local d'exploitation en s'inspirant des connaissances et méthodes existantes dans le secteur du bâtiment (industriel et tertiaire).
- Développer un outil logiciel pour faciliter la saisie et la validation des données, automatiser les calculs et la présentation des résultats (tableaux et

graphiques), assister l'utilisateur dans la validation des calculs et la réduction de l'Erreur.

- Adapter cet outil logiciel pour une application en ligne et en temps réel dans les supervisions.

L'analyse des consommations spécifiques par (sous-)postes est restée limitée par le faible nombre d'observations en provenance du terrain et de la bibliographie. Pourtant, les premières conclusions suggèrent que les consommations par postes se prêteraient à une analyse statistique similaire à celle menée sur les consommations globales dans le Chapitre 1 si l'on pouvait accumuler plus d'observations. Les données en provenance du terrain pourraient être abondées par de nouvelles études de cas, y compris par les audits énergétiques menés par des exploitants ou des bureaux d'étude. Le périmètre des recherches bibliographiques pourrait être étendu, en incluant la bibliographie technique et scientifique étrangère.

La construction et l'analyse statistique de bases de données sur les consommations spécifiques par (sous-)postes pourrait alors permettre de dégager des valeurs de référence par technologie, d'identifier les facteurs de variation, de comparer les valeurs du terrain et de la bibliographie et d'expliquer leurs écarts. On pourrait alors finalement disposer de références ou même d'équations pour évaluer les consommations spécifiques observées à l'échelle des sous-postes sur une installation donnée, et pour juger des performances énergétiques et des gains possibles.

Liste des références bibliographiques

Références citées dans le rapport

- ASTEE et ADEME (2013). Guide méthodologique d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des services de l'eau et de l'assainissement. 3^{ème} édition. 38 p. + annexes
- Lagarrigue C. (2015). Réduire l'impact énergétique des systèmes d'assainissement : Positionnement de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. Journée technique "Optimisation énergétique des services d'assainissement", ASTEE Languedoc Roussillon, 5 mars 2015, Nîmes
- Luneau S. (2011). Bassins d'aération. La chasse au gaspillage est ouverte. Hydroplus 204: 29-34.

Références exploitées pour construire la base de données bibliographique sur les consommations spécifiques globales

- Balmér P. (2000). Operation costs and consumption of resources at Nordic nutrient removal plants. *Water Science and Technology* 41(9): 273-279.
- Balmér P. and Hellström D. (2012). Performance indicators for wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 65 (7): 1304-1310.
- Barillon B., Martin Ruel S., Langlais C. and Lazarova V. (2013). Energy efficiency in membrane bioreactors. *Water Science and Technology* 67(12): 2685-2691.
- Bodik I., Kubaska M. (2013). Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environment Protection Engineering* 39(2) : 15-24.
- Brepols C., Schäfer H. and Engelhardt N. (2010). Considerations on the design and financial feasibility of full-scale membrane bioreactors for municipal applications. *Water Science and Technology* 61(10): 2461-2468.
- Cornel P., Wagner M. and Krause S. (2003). Investigation of oxygen transfer rates in full scale membrane bioreactors. *Water Science and Technology* 47 (11): 313-319.
- Ersu C., Arslankaya E., Say K.O., Fox D., Aldrich L. and Copeman J. (2008). Modification of a full-scale sequencing batch reactor operational mode for biological nutrient removal. *Water Environment Research* 80(3): 257-266.
- Fatone F., Battistoni P., Pavan P. and Cecchi F. (2007). Operation and maintenance of full-scale municipal membrane biological reactors: a detailed overview on a case study. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 46 (21): 6688-6695.
- Fenu A., Roels J., Wambecq T., De Gussem K., Thoeve C., De Gueldre G. and Van De Steene B. (2010). Energy audit of a full scale MBR system. *Desalination* 262(1): 121-128.
- Franco X. (2012). Etude diagnostique des consommations énergétiques de la station d'épuration de Golbey (80 000 EH) (Vosges). Rapport de stage, ENGEES, 25 p. + annexes

- Giesen A., Van Bentem A., Gademan G. and Erwee H. (2008). Lessons learnt in facility design, tendering and operation of MBR's for industrial and municipal wastewater treatment. In: Proceedings of WISA Biennial Conference and Exhibition, Sun City, South Africa.
- Gil J.A., Tua L., Rueda A., Montano B., Rodriguez M. and Prats D. (2010). Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR. *Desalination* 250(3): 997-1001.
- Hédout A. et Tabuchi J.P. (2012). Vers une plus grande autonomie énergétique des stations d'épuration ? *Sciences Eaux et Territoires* n°9/2012: 60-63
- Helmreich B., Schreff D. and Wilderer P.A. (2000). Full scale experiences with small sequencing batch reactor plants in Bavaria. *Water Science and Technology* 41(1): 89-96.
- Hernandez-Sancho F., Molinos-Senante M. and Sala-Garrido R. (2011). Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach. *Science of The Total Environment* 409(14): 2693-2699.
- Jenicek P., Kutil J., Benes O., Todt V., Zabranska J. and Dohanyos M. (2013). Energy self-sufficient sewage wastewater treatment plants: is optimized anaerobic sludge digestion the key? *Water Science and Technology* 68(8): 1739-1744.
- Jin D., Wang B., Wang L. (1998). Design and operation of a wastewater treatment plant treating low concentration of municipal wastewater. *Water Science and Technology* 38(3): 167-172.
- Judd S. (2011). *The MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Kalbar P.P., Karmakar S. and Asolekar S.R. (2013). Assessment of wastewater treatment technologies: Life cycle approach. *Water and Environment Journal* 27(2): 261-268.
- Koch Membrane Systems (2011). Membrane bioreactors: Advanced membranes improve energy efficiency and reduce lifecycle costs. *Filtration and Separation* 48(1), 34-37.
- Komesli O. and Gokcay C. (2010). *Treatment and Reuse of Domestic Wastewater by MBR (Membrane Bioreactor): The Energy Consumption of the MBR*. Istanbul, Turkey, p. 996.
- Krampe J. (2013). Energy benchmarking of South Australian WWTPs. *Water Science and Technology* 67(9): 2059-2066.
- Krzeminski P., van der Graaf J.H.J.M. and van Lier J.B. (2012). Specific energy consumption of membrane bioreactor (MBR) for sewage treatment. *Water Science and Technology* 65(2): 380-392.
- Lazarova V., Martin Ruel S., Barillon B., Dauthuille P. (2012). The role of MBR technology for the improvement of environmental footprint of wastewater treatment. *Water Science and Technology* 66(10): 2056-2064
- Lazarova V., Martin S., Bonroy J. and Dauthuille P. (2010). Main strategies for improvement of energy efficiency of membrane bioreactors. In: *Proceedings of IWA Regional Conference on Membrane Technology and Water Reuse (MTWR)*, 18-22 October 2010, Istanbul, Turkey: 1078-1080.
- Livingstone, D. (2008). MBR turndown. <http://www.wwdmag.com/MBR-Turndown-article9769>, Scranton Gillette Communications.
- Malcolm Pirnie, Inc. (2008). *Statewide assessment of energy use by the municipal water and wastewater sector*. New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), Final Report 08-17, 42 p. + annexes
- Mamais D., Noutsopoulos C., Dimopoulou A., Stasinakis A., Lekkas T. D. (2015). Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Science and Technology* 71(2): 303-308.

- Mizuta K. and Shimada M. (2010). Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Water Science and Technology* 62(10): 2256-2262.
- Nowak O. (2003). Benchmarks for the energy demand of nutrient removal plants. *Water Science and Technology* 47(12): 125-132.
- Nowak O., Keil S. and Fimml C. (2011). Examples of energy self-sufficient municipal nutrient removal plants. *Water Science and Technology* 64(1): 1-6.
- Pellegrin M.L. and Kinnear, D. J. (2011). MBR energy consumption: comparing operating full scale plants. 84th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference (WEFTEC.11), 16-19 October 2011, Los Angeles, CA, USA.
- Peters M., Newland M., Seviour T., Broom T. and Bridle T. (2004). Demonstration of enhanced nutrient removal at two full-scale SBR plants. *Water Science and Technology* 50(10): 115-120.
- Precigoux V. (2001). Etude des filières de traitement à boues activées en fonctionnement séquentiel (SBR : Sequencing Batch Reactor). Mémoire de fin d'études, ENGEES, 69 p. + annexes
- Racault Y., Husson A. et Vedrenne J. (2006). Bilan de fonctionnement sur le long terme de deux filières de bioréacteur à membrane : performances et contraintes. Rapport Irstea, 74 p.
- Racault Y., Husson A., Delrue F. et Vedrenne J. (2010). Evaluation du procédé bioréacteur à membranes immergées (BRM) : installation de Grasse Roumigières. Rapport scientifique, Irstea., 68 p.
- Rodriguez-Garcia G., Molinos-Senante M., Hospido A., Hernandez-Sancho F., Moreira M.T. and Feijoo G. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research* 45(18): 5997-6010.
- Ryan O. (2007). Energy Efficiency Solutions for a Full-Scale MBR Plant. Cranfield University, Cranfield.
- Schleypen P., Michel I. and Siewert H.E. (1997). Sequencing batch reactors with continuous inflow for small communities in rural areas in Bavaria. *Water Science and Technology* 35(1): 269-276.
- Sobantka A. and Rechberger H. (2013). Extended statistical entropy analysis (eSEA) for improving the evaluation of Austrian wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 67(5): 1051-1057.
- Steinmetz H., Wiese J. and Schmitt T.G. (2002). Efficiency of SBR technology in municipal wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 46(4-5): 293-299.
- Svardal K. and Kroiss H. (2011) Energy requirements for waste water treatment. *Water Science and Technology* 64(6): 1355-1361.
- Tao G., Kekre K., Oo M.H., Viswanath B., Yusof A.M. and Seah H. (2010). Energy Reduction and Optimisation in Membrane Bioreactor Systems. *Water Practice and Technology* 5(4).
- Turgeon J. and Toffey W. E. (2010). Employing energy management planning to achieve net zero energy in wastewater operations. 83rd Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference (WEFTEC.10), 2-6 October 2010, New Orleans, Louisiana, USA.
- Ueda T., Hata K. and Kikuoka Y. (1996). Treatment of domestic sewage from rural settlements by a membrane bioreactor. *Water Science and Technology* 34(9): 189-196.
- Venkatesh G. and Brattembø H. (2011). Environmental impact analysis of chemicals and energy consumption in wastewater treatment plants: case study of Oslo, Norway. *Water Science and Technology* 63(5): 1018-1031.
- Wang J. W., Zhang T. Z., Chen J. N. (2010). Operating costs for reducing total emission loads of key pollutants in municipal wastewater treatment plants in China. *Water Science and Technology* 62 (5): 995-1002.

- Yang L., Zeng S., Chen J., He M. and Yang W. (2010). Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 62(6): 1361-1370.
- Young D.F. and Koopman B. (1991). Electricity Use in Small Wastewater Treatment Plants. *Journal of Environmental Engineering* 117(3): 300-307.
- Zhang S.Y., van Houten R., Eikelboom D.H., Doddema H., Jiang Z.C., Fan Y. and Wang J.S. (2003). Sewage treatment by a low energy membrane bioreactor. *Bioresource Technology* 90(2): 185-192.

Références exploitées pour proposer des références de consommations spécifiques par (sous-)postes

- ADEME, AESN, Gaz de France (2004). Séchage thermique des boues urbaines et industrielles. Etat de l'art. 10 p.
- Boeglin J.C. (2013). Traitements et destinations finales des boues résiduaires. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés*
- Bouchet C. (2014). Stations d'épuration : combiner performance et efficacité énergétique. *L'Eau, l'Industrie, les Nuisances* 370: 43-59.
- Brison C., Perret J.-M., Canler J.-P. (2010). Le séchage solaire des boues : État actuel de l'art et retours d'expérience. Document technique FNDAE n° 36.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2013). Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Arbeitsblatt DWA-A 216.
- Guibelin E. (2013). Lutte contre la pollution des eaux - Traitements des boues d'épuration. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés*
- Reverdy A.L. et Pradel M. (2011). Evaluation des émissions de Gaz à Effet de Serre des filières de traitement et de valorisation des boues issues du traitement des eaux usées. Rapport Cemagref, 94 p.

Liste des annexes

ANNEXE 1. LISTES DES VARIABLES DE LA BASE DE DONNEES FRANÇAISE.....	78
ANNEXE 2. OUTILS D'ANALYSE STATISTIQUE DES BASES DE DONNEES	81
ANNEXE 3. BILAN DES LIENS ENTRE LES VARIABLES DE L'ECHANTILLON FRANÇAIS	84
ANNEXE 4. DISTRIBUTION DES VARIABLES EXPLICATIVES DE L'ECHANTILLON FRANÇAIS VALIDE	85
ANNEXE 5. DISTRIBUTION DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE DE L'ECHANTILLON FRANÇAIS	91
ANNEXE 6. PREDICTION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BA	94
ANNEXE 7. ELEMENTS D'EXPLICATION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES SBR	96
ANNEXE 8. PREDICTION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BRM	98
ANNEXE 9. PREDICTION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BF	100
ANNEXE 10. ELEMENTS D'EXPLICATION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES MBBR.....	102
ANNEXE 11. COMPARAISON DES CONSOMMATIONS SPECIFIQUES EN FRANCE ET A L'ETRANGER	103
ANNEXE 12. DONNEES A COLLECTER POUR L'ANALYSE DETAILLEE PAR POSTES	104
ANNEXE 13. METHODOLOGIE DE CALCUL DES CONSOMMATION ENERGETIQUES DES MOTEURS.....	105
ANNEXE 14. ESTIMATION DE LA PUISSANCE ABSORBEE DES MOTEURS A FREQUENCE VARIABLE	109
ANNEXE 15. ESTIMATION DE LA CONSOMMATION DU LOCAL D'EXPLOITATION	110
ANNEXE 16. REFERENCES DE CONSOMMATIONS SPECIFIQUES PAR POSTES	113

Annexe 1. Listes des variables de la base de données française

Tableau 23. Liste des variables caractérisant l'échantillon français

		Variables quantitatives		Variables qualitatives
		Intitulé	Unité	Intitulé
Variables explicatives (X)	Géographie	Altitude	m	Bassin
		Température air	°C	Secteur
	Caractéristiques eaux usées	Concentration DCO	mg/L	
		Concentration DBO5	mg/L	
		DCO/DBO5	g/g	
		DCO/MES	g/g	
		DBO5/MES	g/g	
		DCO/NTK	g/g	
		DBO5/NTK	g/g	
		DCO/PT	g/g	
		DBO5/PT	g/g	
	NTK/PT	g/g		
	Conception	Capacité nominale	EH	Taille
		Débit nominal	m3/j	Niveau requis
		Mise en service	année	Primaire
		Age	ans	Secondaire
				Secondaire 1
				Secondaire 2
				Tertiaire
				Désodorisation
				Digestion
			Valorisation biogaz	
	Charge filière eau	Charge DCO reçue	kg/j	Variation de charge
		Charge DBO5 reçue	kg/j	
		Débit reçu	m3/j	
		Taux de charge DCO	%	
		Taux de charge DBO5	%	
		Taux de charge hydraulique	%	
	Performances filière eau	Rendement DCO	%	Niveau réel
Rendement DBO5		%		
Rendement MES		%		
Rendement NTK		%		
Rendement NGL		%		
Rendement PT		%		
Performances filière boues	Siccité	%	Niveau de siccité	
			Séchage	
	Nombre	29	16	
Variables à expliquer (Y)	Consommation d'énergie	Ytot	kWh/j	
		Ytot_DCO	kWh/kgDCO élm	
		Ytot_DBO	kWh/kgDBO5 élm	
		Ytot_V	kWh/m3 traité	
		Nombre	4	0
Variable dérivée	Validité			Validité
	Nombre	0		1

Tableau 24. Liste des modalités des variables explicatives qualitatives

	Variables qualitatives			
	Variable	Modalités		
		Nombre	Intitulés	Notation
Géographie	Bassin	7	Adour-Garonne	AG
			Artois-Picardie	AP
			Loire-Bretagne	LB
			Rhin-Meuse	RM
			Rhône-Méditerranée-Corse	RMC
			Seine-Normandie	SN
			Départements d'outre-mer	OM
	Secteur	5	Nord-Est	NE
			Nord-Ouest	NO
			Sud-Est	SE
Sud-Ouest			SO	
Départements d'outre-mer			OM	
Filière eau	Taille	4	Très petite (< 2 KEH)	TPT
			Petite (2 à 10 KEH)	PT
			Moyenne (10 à 50 KEH)	MT
			Grosse (≥ 50 KEH)	GT
	Variation de charge	4	Absence	ABS
			Effluents vinicoles	VINI
			Tourisme estival (littoral)	TR_ET
			Tourisme hivernal (montagne)	TR_HV
	Niveau requis & réel	3	Carbone seul (+ déphosphatation éventuelle)	C(P)
			Nitrification (+ déphosphatation éventuelle)	CN(P)
			Dénitrification (+ déphosphatation éventuelle)	CNDN(P)
	Primaire	3	Absence	ABS
			Décantation gravitaire	GRV
			Décantation physico-chimique	PHCH
	Secondaire	5	Boue activée	BA
			Réacteur biologique séquentiel	SBR
			Bioréacteur à membranes	BRM
			Biofiltre	BF
			Lit fluidisé sur supports plastiques mobiles	MBBR
	Tertiaire	4	Absence	ABS
Affinage (MES et/ou P)			AFF	
Désinfection			DIF	
Affinage + désinfection			AFF+DIF	
Filière air	Désodorisation	4	Absence	ABS
			Charbon actif	CA
			Biologique	BIO
			Chimique	CHMQ
Filière boues	Digestion	3	Absence	ABS
			Digestion aérobie	DAER
			Digestion anaérobie	DANA
	Valorisation biogaz	3	Absence	ABS
			Chaleur	CH
			Chaleur + électricité (cogénération)	CH+EL
	Niveau de siccité	4	Épaississement (ou siccité < 7%)	EP
			Déshydratation filtre bande (ou siccité 7%-17%)	DH1
			Déshydratation centrifugeuse ou filtre plateaux (ou siccité 18%-35%)	DH2
			Séchage ou incinération (ou siccité ≥ 35%)	SEC
Séchage	2	Siccité réelle < 35%	ABS	
		Siccité réelle ≥ 35%	SEC	
Validité	2	Validé	VLD	
		Extrême	XTR	

Tableau 25. Liste des modalités pour les variables Secondaire 1 et 2

Secondaire	Secondaire 1			Secondaire 2		
Modalité	Intitulé	Modalités		Intitulé	Modalités	
BA	Aération	Fond - Diffuseurs	FD			
		Fond - Turbine	FT			
		Surface - Brosse	SB			
		Surface - Turbine	ST			
SBR	Agitation	Sans	ABS			
		Avec	AGT			
BRM	Membranes	Planes	MP	Configuration	Intégrée	INT
		Fibres creuses	FC		Séparée	SEP
		Tubulaires	TB		Externe	EXT
BF	Technologie	Biocarbone	BCB	Etages	1 étage	ET1
		Biofor	BFR		2 étages	ET2
		Biostyr	BST		3 étages	ET3
		Biopur	BPR			
MBBR	Séparation	Clarificateur	CLR	Etages	1 étage	ET1
		Flottateur	FLT		2 étages	ET2
					3 étages	ET3

Annexe 2. Méthodes d'analyse statistique des bases de données

Analyse univariée

L'analyse univariée considère les variables une à une afin :

- de caractériser la position, la dispersion et la distribution de l'échantillon en utilisant des techniques de statistiques descriptives numériques (moyenne, médiane, mode, écart type, quantiles, asymétrie, aplatissement,...) et graphiques ;
- d'extrapoler ces informations à la population, en utilisant des techniques de statistiques inférentielles (intervalles de confiance, test de normalité de Shapiro-Wilk, test d'ajustement d'une distribution de Kolmogorov-Smirnov) ;
- d'initier le repérage des variables peu pertinentes (trop de valeurs manquantes, peu de variabilité,...) et des valeurs extrêmes, afin de les remplacer ou de les écarter de la base de données.

L'analyse univariée constitue aussi une étape préparatoire à l'analyse bi-variée, en guidant par exemple le choix des méthodes à utiliser.

Analyse bi-variée

L'analyse bi-variée considère les variables prises deux à deux afin d'établir la présence ou au contraire l'absence de lien :

- entre une variable à expliquer et chacune des variables explicatives (couples Y - X)
- entre les variables explicatives (couples X - X). Ceci permet de repérer des redondances d'information, qui sont fréquentes dans les bases de données construites à partir de données existantes. On peut alors écarter des variables ou regrouper des modalités pour ne conserver dans la base de données que l'information la plus pertinente au sens statistique et pratique.

L'analyse bi-variée constitue aussi une étape préparatoire à la modélisation multivariée, en guidant par exemple la présélection des variables explicatives.

L'analyse bi-variée peut aussi servir à comparer des échantillons issus de différentes bases (exemples : échantillon / population, échantillon français / étranger,...) ou des sous-échantillons d'une même base (exemple : les 5 procédés secondaires de l'échantillon français). La comparaison revient en fait à étudier l'influence d'une variable X qualitative, dont chaque modalité définit un (sous-)échantillon, sur une autre variable (quantitative ou qualitative). Les échantillons d'origine différente peuvent ainsi être concaténés au sein d'une unique base de données, en ajoutant une variable qualitative qui indique l'origine des données.

L'analyse bi-variée repose sur des tests statistiques, listés sous la forme de grilles de sélection en Annexe 1. Le choix du test à utiliser dépend en effet :

- de la question posée ;
- de la nature des variables (quantitatives/qualitatives) ;
- pour les variables quantitatives, de la conformité à l'hypothèse de normalité et/ou à celle de l'homogénéité des variances entre sous-échantillons ou modalités ;
- pour les variables qualitatives, du nombre de modalités ou de sous-échantillons à comparer (2, ou plus de 2) ;
- dans certains cas, du nombre d'observations disponibles.

La plupart des **variables quantitatives** de la base de données, qu'elles soient à expliquer ou explicatives, ne suivent pas une loi normale selon les tests de Shapiro-Wilk. Les distributions rencontrées sont plutôt de type asymétrique ou multimodal. Dans ce cas, il faut utiliser des tests dits "non paramétriques" : les calculs ne sont pas effectués directement sur les valeurs des variables, mais sur leur rang, obtenu par classement croissant. Pour simplifier, les tests non paramétriques comparent des médianes alors que les tests paramétriques comparent des moyennes. L'utilisation des rangs appauvrit l'information de départ, ce qui présente à la fois des avantages et des inconvénients. Pour l'étude de la corrélation entre deux variables quantitatives, l'utilisation des rangs permet de détecter des relations de type non linéaire, pourvu qu'elles soient monotones. La formule adoptée pour calculer le coefficient de corrélation est donc celle de Spearman (et non de Pearson), et il est de ce fait désigné par la notation r_s .

Lorsqu'on étudie l'effet d'une variable qualitative possédant plus de deux modalités sur une autre variable, le test est d'abord effectué sur l'ensemble des modalités. Si un effet significatif est détecté, un test supplémentaire est conduit afin de comparer toutes les modalités (ou les sous-échantillons) deux à deux, pour identifier quelle(s) paire(s) diffère(nt) et caractériser le sens et l'amplitude de l'écart.

Analyse multivariée

La technique utilisée ici est l'analyse de la covariance (ANCOVA). Elle fait partie des méthodes de modélisation statistique linéaire généralisée (GLM), dont le principe est d'exprimer une variable à expliquer (Y) en fonction d'une combinaison linéaire des n variables explicatives les plus déterminantes (X_i) et d'un terme aléatoire ε :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon$$

ε est appelé résidu et représente en fait la différence entre la valeur observée de Y et celle prédite par le modèle :

$$\varepsilon = Y_{obs} - Y_{préd}$$

Le choix de l'ANCOVA s'impose face à la structure de la base de données, car elle combine les principes de la régression, réservée aux variables explicatives quantitatives, avec ceux de l'analyse de variance (ANOVA), réservée aux variables explicatives qualitatives. Ainsi, les variables X_i de l'équation ci-dessus peuvent être :

- une variable quantitative, sous sa forme originale ou transformée par une fonction simple telle que logarithme népérien (ln), exponentielle (exp), ou puissance (carré, cube,...) ;
- une variable binomiale (valeur 0 ou 1) représentant chacune des modalités d'une variable qualitative.

Les *coefficients* a_i sont déterminés par la technique d'optimisation des moindres carrés. Elle vise à minimiser la somme des carrés des *résidus*, qui représentent les écarts entre les valeurs observées et prédites de Y. Les résidus constituent une nouvelle variable quantitative censée respecter les hypothèses suivantes : sa distribution est normale, sa moyenne est nulle, sa variance est indépendante de la valeur prise par les variables X et Y (homogénéité des variances), ses valeurs sont indépendantes de l'ordre des observations (absence d'autocorrélation).

La modélisation multivariée présente de nombreux avantages par rapport à l'analyse bi-variée :

- Elle prend en compte les effets simultanés des différentes variables explicatives, et éventuellement leurs interactions.
- Elle permet à l'inverse d'étudier l'effet de chaque variable prise individuellement, en soustrayant l'influence des autres variables (analyse de sensibilité).
- Elle permet de sélectionner les variables explicatives significatives, et de les hiérarchiser en fonction de leur contribution à l'explication de la variance totale de Y.
- Elle permet de prédire la valeur moyenne attendue de Y pour toute station d'épuration dont on connaît les valeurs de X, tant que celles-ci se situent dans le domaine de validité du modèle. Il s'agit d'un espace à n dimensions délimité par les plages de variation (min-max) des variables explicatives de l'échantillon utilisé dans la construction du modèle.
- Elle permet d'identifier les observations extrêmes, pour lesquelles la consommation d'énergie observée (Y) ne peut pas être expliquée uniquement par les valeurs de X.

Sa mise en œuvre est cependant longue et complexe. La mise au point d'un modèle comprend une phase de construction, pour sélectionner les variables X et ajuster leurs coefficients, puis une phase de validation, pour évaluer la significativité des variables retenues et de leurs coefficients, la qualité de l'ajustement du modèle, et le respect des hypothèses sous-jacentes sur les résidus. En cas de non-validation, il faut apporter une modification à la source (suppression ou transformation de variables, suppression d'observations,...) et reboucler la procédure.

Annexe 3. Bilan des liens entre les variables de l'échantillon français

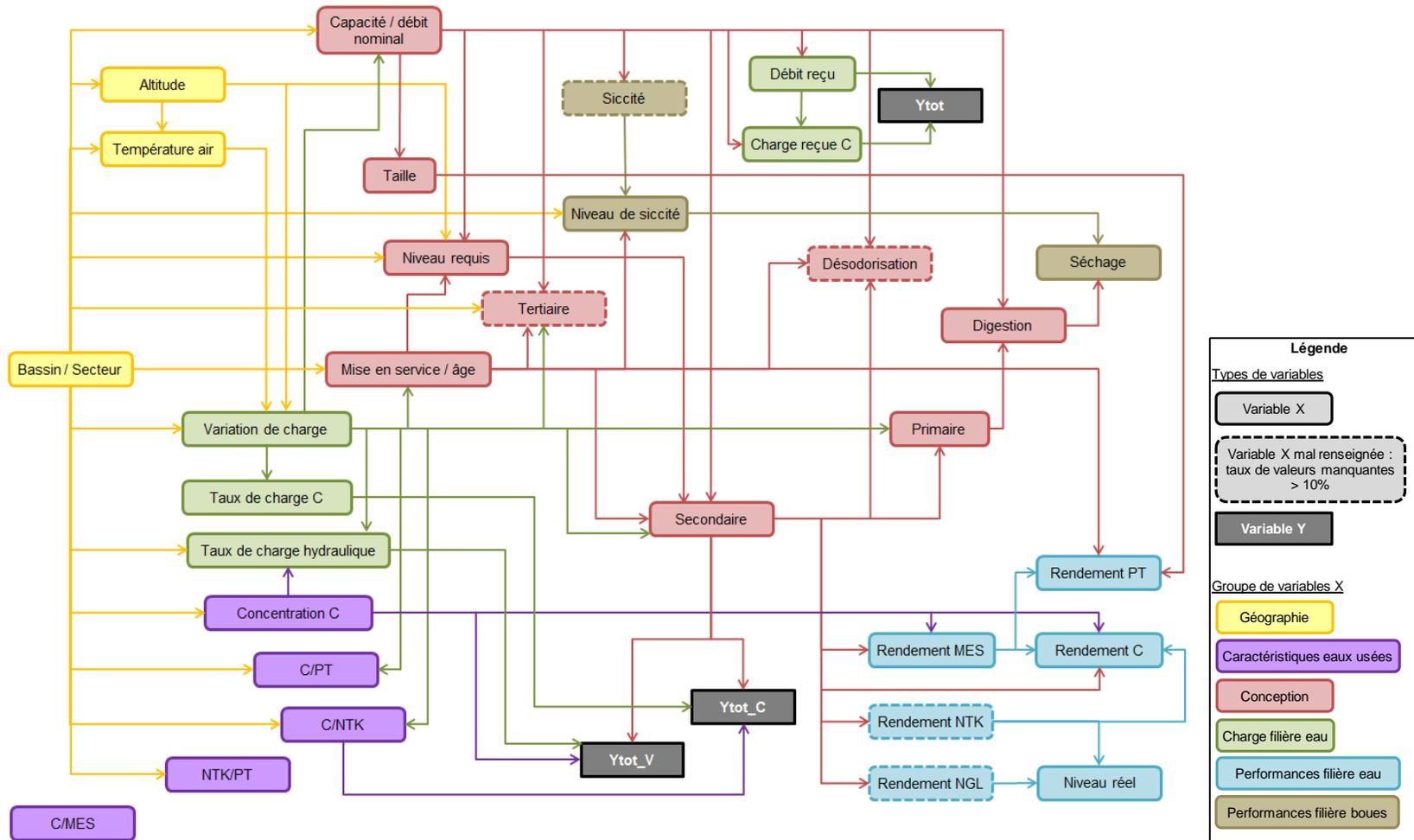


Figure 12. Schéma des liens directs de causalité entre les variables de l'échantillon

Une flèche représente un lien direct et causal, mais les liens indirects peuvent être retrouvés en combinant plusieurs flèches, y compris à contresens. Par exemple, le lien fort entre le procédé primaire et la localisation se retrouve par l'intermédiaire de la variation de charge.

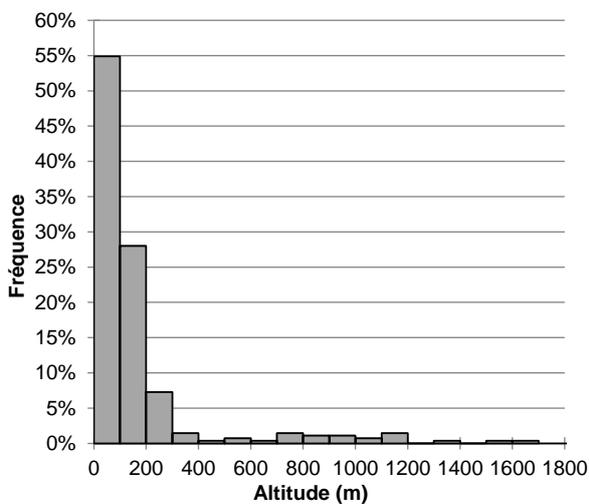
Annexe 4. Distribution des variables explicatives de l'échantillon français validé

Tableau 26. Nombre d'observations validées et extrêmes en fonction du procédé secondaire

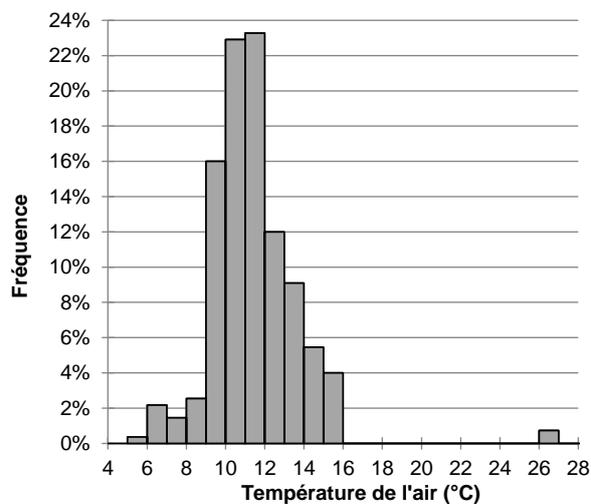
	Effectifs			Fréquence		
	VLD	XTR	Total	VLD	XTR	Total
BA	166	21	187	89%	11%	100%
SBR	12	0	12	100%	0%	100%
BRM	41	14	55	75%	25%	100%
BF	48	7	55	87%	13%	100%
MBBR	8	1	9	89%	11%	100%
Echantillon	275	43	318	86%	14%	100%

Tableau 27. Résumé de la distribution des variables géographiques de l'échantillon validé

			Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne			
			Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)
Géographie	Altitude	m	0	275	0	0	72	167	1 600	<i>(distribution trop asymétrique)</i>			
	Température air	°C	0	275	5.3	10.0	11.1	12.7	26.1	11.4	11.1	11.7	2.3



(a)

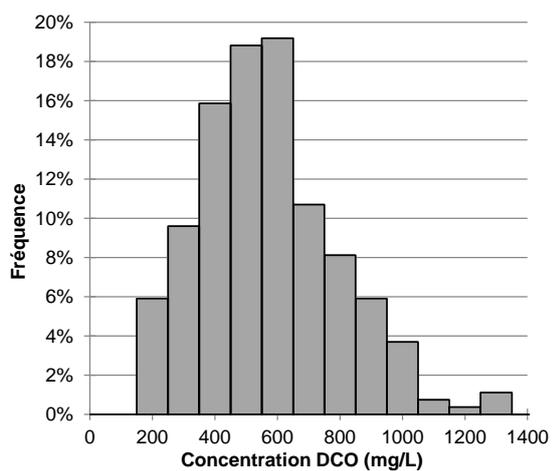


(b)

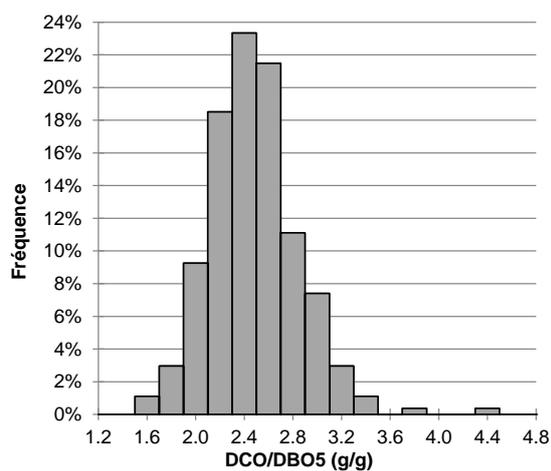
Figure 13. Histogramme de distribution des variables géographiques de l'échantillon validé
(a) altitude (b) température de l'air

Tableau 28. Résumé de la distribution des caractéristiques des eaux usées de l'échantillon validé

			Nombre		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
			Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Caractéristiques eaux usées	Concentration DCO	mg/L	4	271	173	413	549	713	1 348	568	541	595	224	39%
	Concentration DBO5	mg/L	2	273	40	167	217	284	649	235	223	247	102	43%
	DCO/DBO5	g/g	5	270	1.58	2.25	2.43	2.67	4.33	2.48	2.43	2.52	0.37	15%
	DCO/MES	g/g	4	271	0.97	1.77	2.01	2.25	4.01	2.04	1.99	2.08	0.38	18%
	DBO5/MES	g/g	5	270	0.40	0.69	0.82	0.95	1.74	0.85	0.82	0.87	0.22	26%
	DCO/NTK	g/g	10	265	3.9	8.6	9.7	11.1	22.9	10.1	9.8	10.4	2.3	23%
	DBO5/NTK	g/g	11	264	1.8	3.5	4.0	4.6	10.3	4.2	4.0	4.3	1.2	28%
	DCO/PT	g/g	23	252	33	72	79	89	149	81	79	83	17	20%
	DBO5/PT	g/g	24	251	13	28	32	37	72	33	32	34	9	26%
NTK/PT	g/g	23	252	3.8	7.6	8.2	8.8	11.1	8.1	8.0	8.2	1.1	13%	



(a)



(b)

Figure 14. Histogramme de distribution des caractéristiques des eaux usées de l'échantillon validé (a) concentration en DCO (b) ratio DCO/DBO₅

Tableau 29. Résumé de la distribution des charges et taux de charge de la filière eau de l'échantillon validé

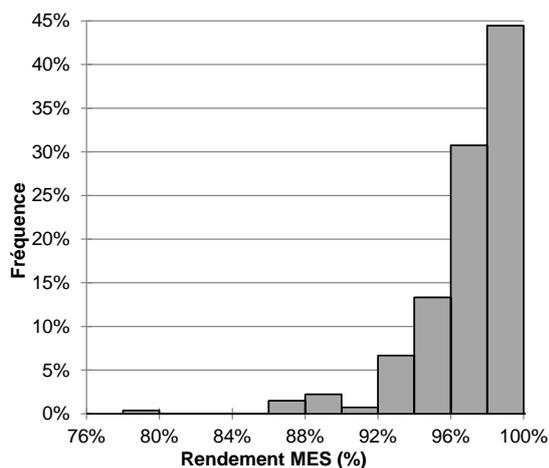
			Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
			Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Charges filière eau	Charge DCO reçue	kg/j	4	271	67	436	1 050	2 715	79 470	<i>(distributions trop asymétriques)</i>				
	Charge DBO5 reçue	kg/j	2	273	18	186	459	1 189	34 490					
	Débit reçu	m3/j	0	275	121	850	1 998	5 006	231 566					
	Taux de charge DCO	%	19	256	16%	38%	52%	70%	161%	57%	53%	60%	26%	45%
	Taux de charge DBO5	%	2	273	10%	34%	47%	59%	120%	49%	47%	51%	21%	42%
	Taux de charge hydraulique	%	0	275	18%	44%	57%	79%	164%	64%	60%	67%	27%	43%

Tableau 30. Résumé de la distribution des caractéristiques de conception de l'échantillon validé

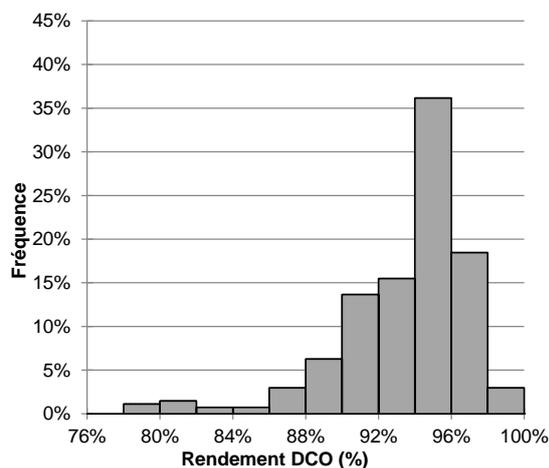
			Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
			Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Conception	Capacité nominale	EH	0	275	2 000	6 912	16 667	46 250	1 016 667	<i>(distributions trop asymétriques)</i>				
	Débit nominal	m3/j	0	275	370	1 503	3 214	9 508	240 000					
	Mise en service	année	0	275	1 971	1 995	2 004	2 009	2 012	2 000	1 999	2 002	10	1%
	Age	ans	0	275	1.0	4.0	8.0	17.0	41.0	11.7	10.5	12.9	10.1	86%

Tableau 31. Résumé de la distribution des performances de traitement de la filière eau et boues de l'échantillon validé

			Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
			Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Performances de traitement filière eau et boues	Rendement DCO	%	4	271	78.0%	91.8%	94.4%	95.8%	98.8%	93.5%	93.0%	93.9%	3.6%	3.9%
	Rendement DBO5	%	5	270	79.9%	96.6%	98.1%	98.8%	99.7%	97.3%	97.0%	97.6%	2.6%	2.6%
	Rendement MES	%	5	270	79.8%	96.0%	97.7%	98.8%	99.8%	97.0%	96.6%	97.3%	2.7%	2.8%
	Rendement NTK	%	41	234	25%	86%	93%	95%	99%	86%	84%	88%	17%	19%
	Rendement NGL	%	37	238	14%	76%	87%	91%	99%	78%	76%	81%	21%	26%
	Rendement PT	%	35	240	3%	78%	88%	92%	99%	81%	79%	84%	17%	21%
	Siccité	%	58	217	0.4%	14%	21%	27%	89%	22%	20%	24%	14%	66%

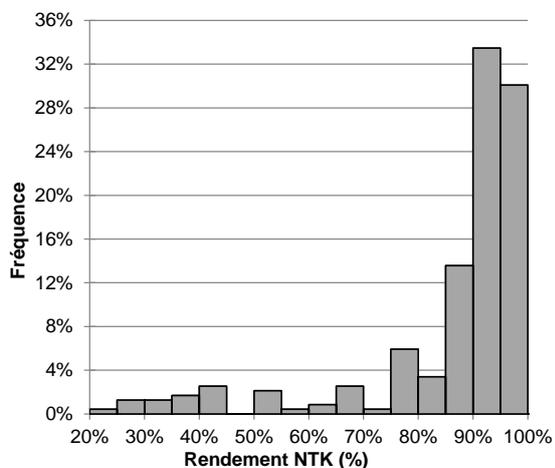


(a)

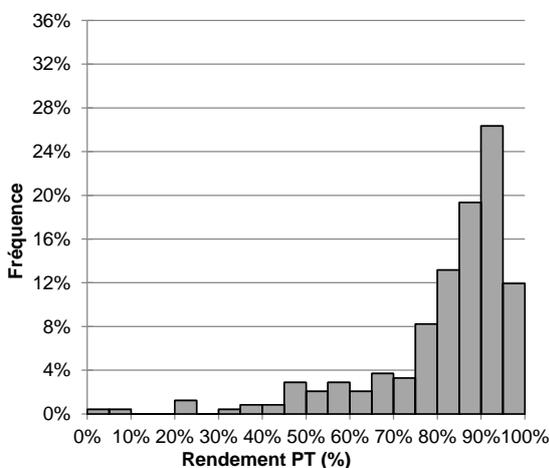


(b)

Figure 15. Histogramme de distribution des rendements d'élimination (a) en MES (b) en DCO



(a)



(b)

Figure 16. Histogramme de distribution des rendements d'élimination (a) en NTK (b) en PT

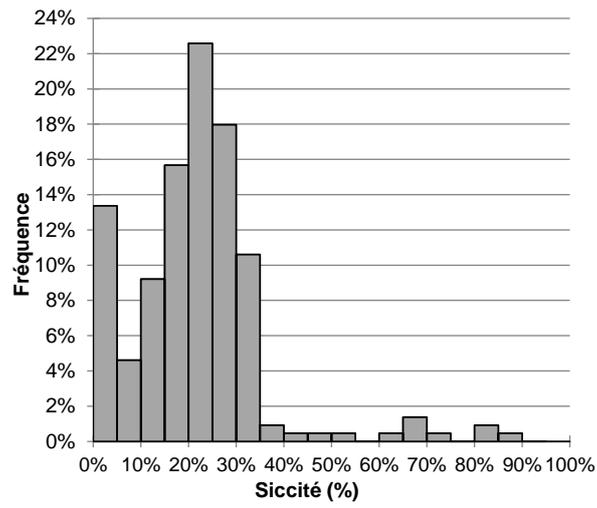


Figure 17. Histogramme de distribution de la siccité des boues traitées

Annexe 5. Distribution des consommations d'énergie de l'échantillon français validé

Tableau 32. Résumé de la distribution de la consommation d'énergie absolue de l'échantillon validé en fonction du procédé secondaire

		Effectif		Résumé de la distribution				
		Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum
Ytot (kWh/j)	BA	2	164	105	482	1 004	2 541	103 160
	SBR	0	48	411	2 895	4 623	11 759	55 277
	BRM	0	41	387	1 325	2 023	4 613	14 700
	BF	0	8	1 459	2 153	4 516	8 499	13 907
	MBBR	0	12	379	1 232	2 657	4 602	62 822
	Echantillon	2	273	105	681	1 653	4 486	103 160

		Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
		Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Ytot_DBO (kWh/kgDBO5 élm)	BA	7	159	1.5	2.6	3.1	3.8	6.8	3.2	3.1	3.4	0.95	29%
	SBR	0	12	2.8	3.4	5.0	5.6	5.9	4.6	3.9	5.3	1.14	24%
	BRM	1	40	3.6	5.7	6.6	8.0	11.0	6.8	6.2	7.4	1.79	26%
	BF	1	47	1.6	3.1	4.0	5.1	9.6	4.5	3.9	5.0	1.94	43%
	MBBR	0	8	4.8	5.6	6.4	7.3	8.3	6.5	5.4	7.5	1.25	18%
	Echantillon	9	266	1.5	2.8	3.6	5.0	11.0	4.2	3.9	4.4	1.87	45%

		Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
		Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Ytot_V (kWh/m3)	BA	2	164	0.29	0.50	0.65	0.84	1.69	0.70	0.66	0.75	0.29	41%
	SBR	0	12	0.36	0.83	0.98	1.32	2.01	1.07	0.78	1.36	0.45	41%
	BRM	1	40	1.11	1.42	1.67	1.91	2.49	1.68	1.58	1.79	0.34	20%
	BF	1	47	0.24	0.57	0.76	1.12	2.15	0.86	0.74	0.99	0.43	49%
	MBBR	0	8	0.63	1.26	1.50	1.78	2.94	1.58	1.01	2.14	0.67	40%
	Echantillon	4	271	0.24	0.53	0.76	1.18	2.94	0.92	0.86	0.98	0.50	54%

Tableau 33. Comparaison de la distribution des consommations d'énergie des observations validées et extrêmes pour les BA

		Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
		Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Ytot (kWh/j)	VLD	2	164	105	482	1 004	2 541	103 160	<i>(distributions trop asymétriques)</i>				
	XTR	0	21	123	329	508	941	20 740					
Ytot_DCO (kWh/kgDCO él _m)	VLD	9	157	0.73	1.11	1.31	1.63	2.63	1.39	1.32	1.45	0.39	28%
	XTR	2	19	0.42	1.87	2.29	2.70	8.22	2.48	1.67	3.28	1.67	66%
Ytot_DBO (kWh/kgDBO5 él _m)	VLD	7	159	1.46	2.56	3.09	3.80	6.81	3.25	3.10	3.40	0.95	29%
	XTR	0	21	1.24	3.82	4.94	6.51	23.62	6.01	3.69	8.34	5.11	83%
Ytot_V (kWh/m3 traité)	VLD	2	164	0.29	0.50	0.65	0.84	1.69	0.70	0.66	0.75	0.29	41%
	XTR	4	17	0.19	0.76	1.04	1.35	1.99	1.07	0.82	1.32	0.48	44%

Tableau 34. Comparaison de la distribution des consommations d'énergie des observations validées et extrêmes pour les BRM

		Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
		Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Ytot (kWh/j)	VLD	0	41	387	1 325	2 023	4 613	14 700	<i>(distributions trop asymétriques)</i>				
	XTR	0	14	498	789	1 030	3 177	9 330					
Ytot_DCO (kWh/kgDCO él _m)	VLD	0	41	1.65	2.47	2.64	3.13	3.90	2.75	2.55	2.94	0.60	22%
	XTR	1	13	1.58	3.63	4.27	4.58	6.29	4.09	3.36	4.83	1.21	28%
Ytot_DBO (kWh/kgDBO5 él _m)	VLD	1	40	3.57	5.71	6.63	7.97	11.02	6.81	6.24	7.38	1.79	26%
	XTR	1	13	5.25	8.07	11.24	12.74	14.74	10.40	8.60	12.19	2.97	27%
Ytot_V (kWh/m3 traité)	VLD	1	40	1.11	1.42	1.67	1.91	2.49	1.68	1.58	1.79	0.34	20%
	XTR	0	14	0.98	1.94	2.20	2.67	3.57	2.27	1.89	2.66	0.66	28%

Tableau 35. Comparaison de la distribution des consommations d'énergie des observations validées et extrêmes pour les BF

		Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
		Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Ytot (kWh/j)	VLD	0	48	411	2 895	4 623	11 759	55 277	<i>(distributions trop asymétriques)</i>				
	XTR	0	7	1 028	1 587	2 104	3 644	8 467					
Ytot_DCO (kWh/kgDCO él _m)	VLD	1	47	0.78	1.39	1.80	2.28	3.72	1.90	1.68	2.13	0.76	40%
	XTR	2	5	1.10	1.85	4.15	4.21	8.68	4.00	0.33	7.67	2.96	66%
Ytot_DBO (kWh/kgDBO5 él _m)	VLD	1	47	1.59	3.14	3.98	5.09	9.56	4.47	3.90	5.04	1.94	43%
	XTR	2	5	2.92	4.03	8.04	11.54	18.13	8.93	1.27	16.59	6.17	62%
Ytot_V (kWh/m ³ traité)	VLD	1	47	0.24	0.57	0.76	1.12	2.15	0.86	0.74	0.99	0.43	49%
	XTR	2	5	0.80	0.96	1.05	1.10	2.70	1.32	0.36	2.29	0.78	53%

Annexe 6. Prédiction de la consommation énergétique des BA

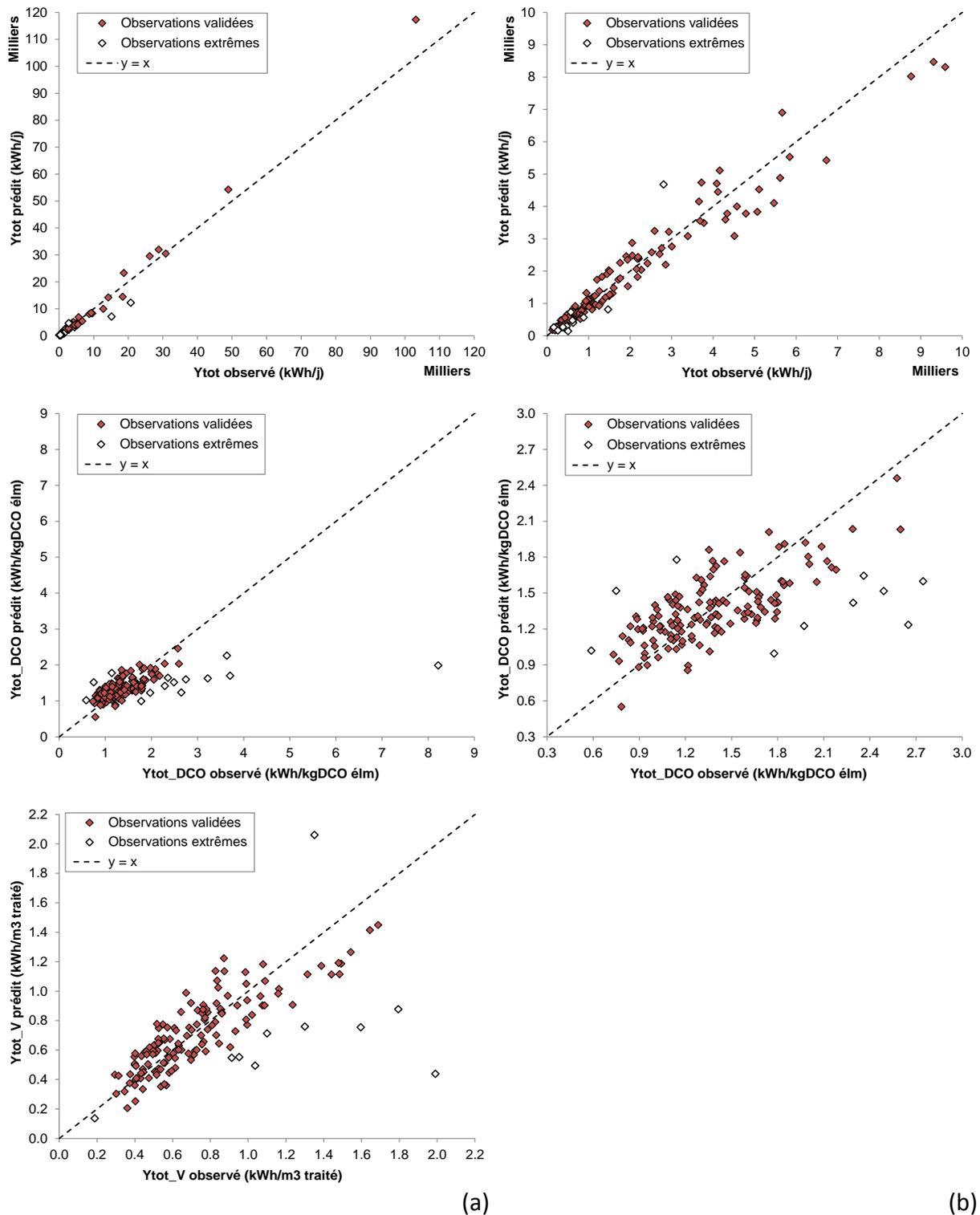


Figure 18. Consommation énergétique des BA de l'échantillon prédite dans le référentiel DCO en fonction de leur consommation observée (a) page entière (b) zoom si nécessaire

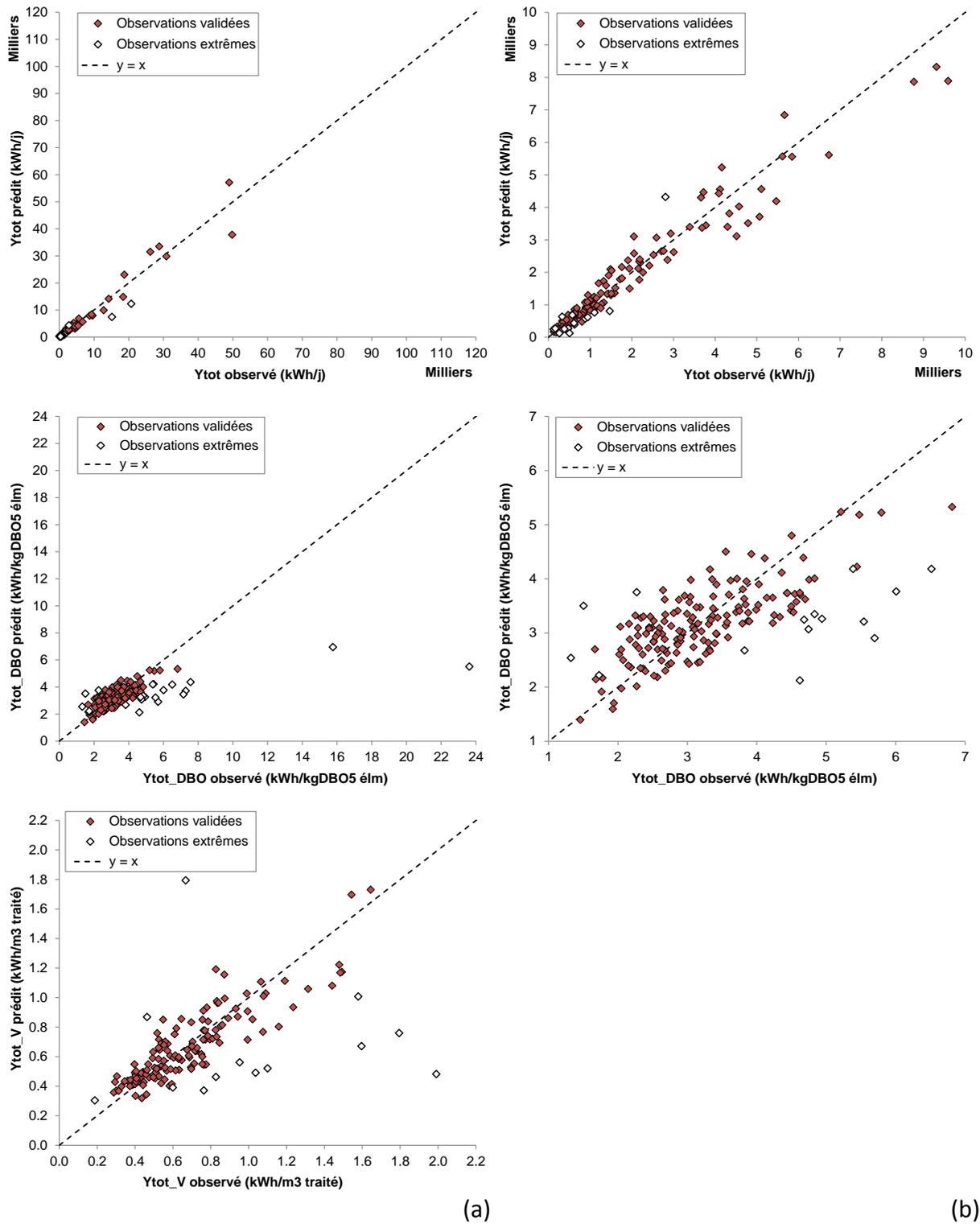


Figure 19. Consommation énergétique des BA de l'échantillon prédite dans le référentiel DBO₅ en fonction de leur consommation observée (a) page entière (b) zoom si nécessaire

Annexe 7. Eléments d'explication de la consommation énergétique des SBR

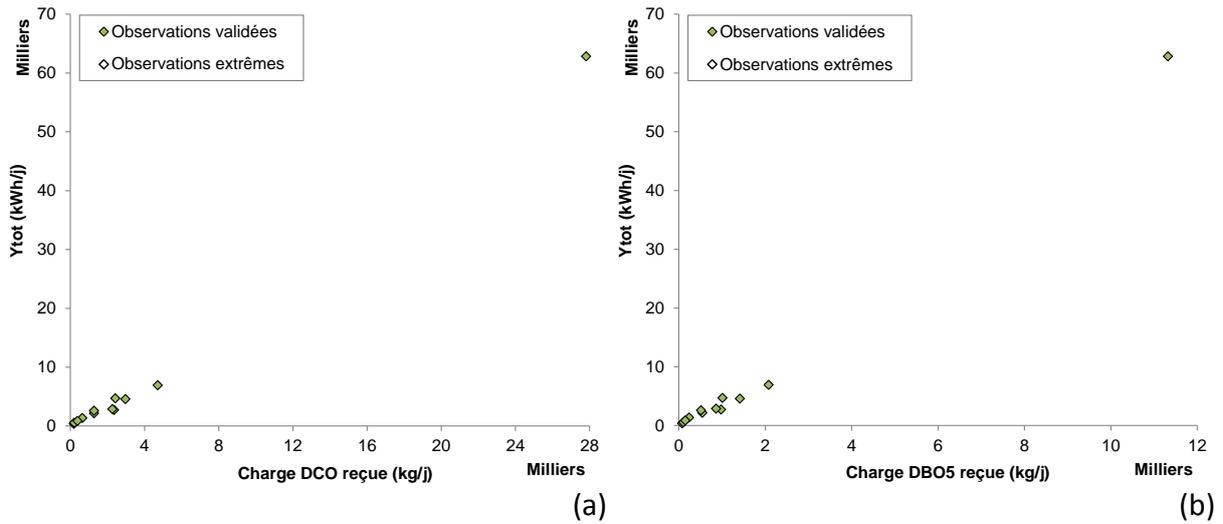


Figure 20. Consommation énergétique Y_{tot} observée sur les SBR de l'échantillon en fonction de la charge organique reçue (a) dans le référentiel DCO ; (b) dans le référentiel DBO_5

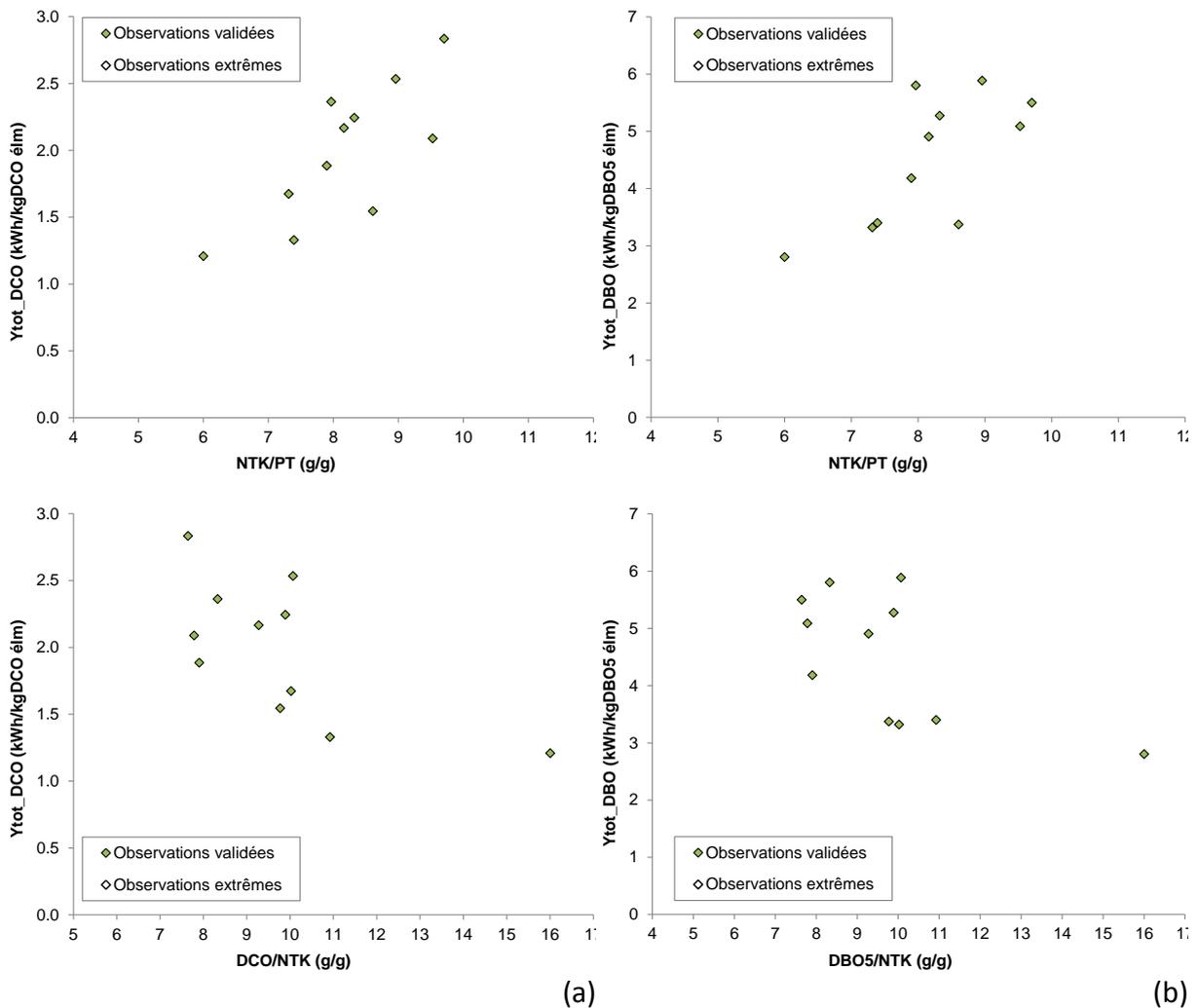


Figure 21. Consommation énergétique Y_{tot_C} observée sur les SBR de l'échantillon en fonction de la teneur en azote de l'eau utilisée (a) dans le référentiel DCO (b) dans le référentiel DBO_5

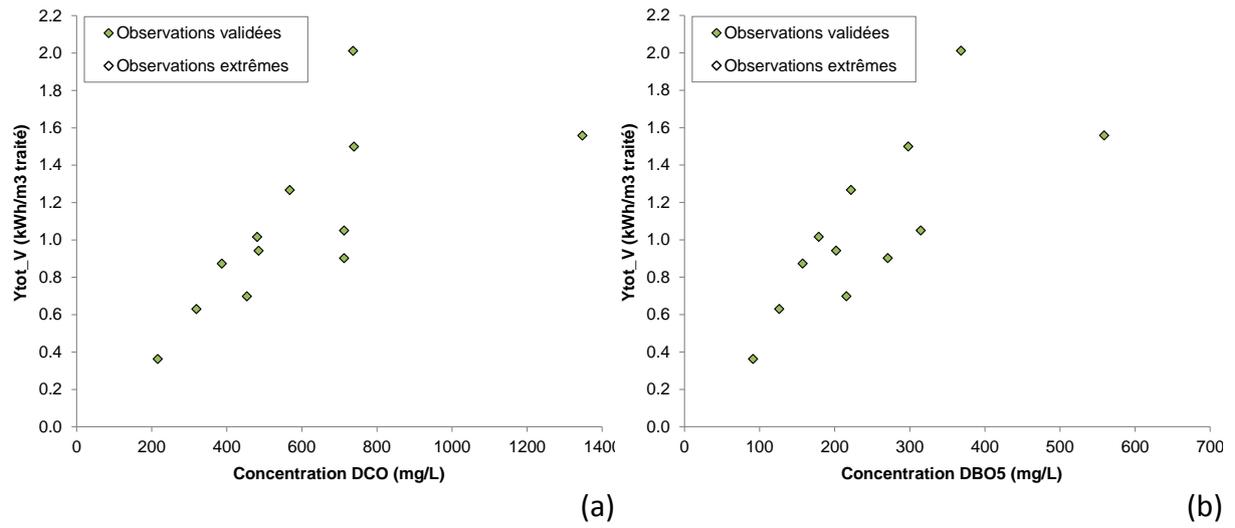


Figure 22. Consommation énergétique Y_{tot_V} observée sur les SBR de l'échantillon en fonction de la concentration des eaux usées (a) dans le référentiel DCO (b) dans le référentiel DBO₅

Annexe 8. Prédiction de la consommation énergétique des BRM

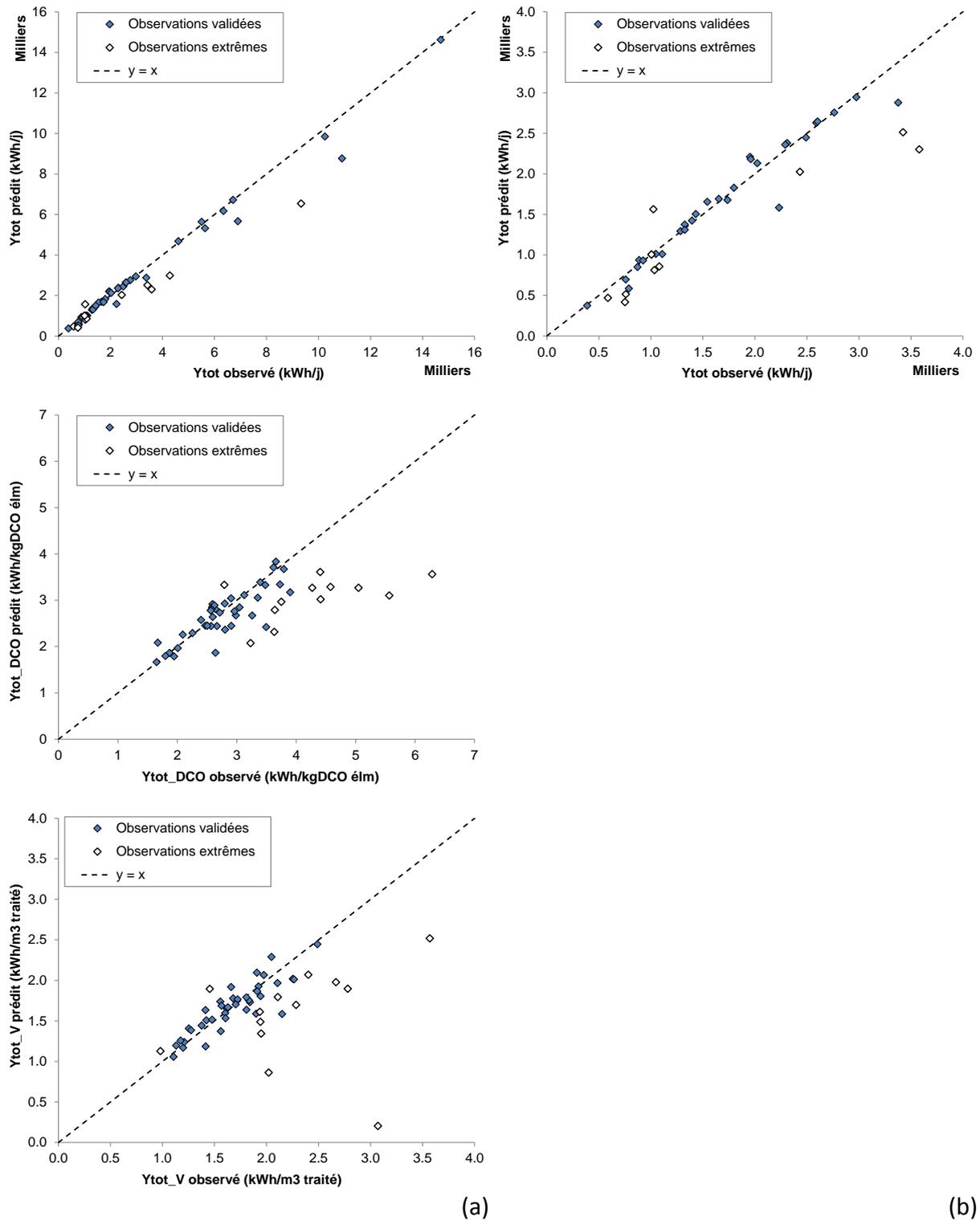


Figure 23. Consommation énergétique des BRM de l'échantillon prédite dans le référentiel DCO en fonction de leur consommation observée (a) page entière (b) zoom si nécessaire

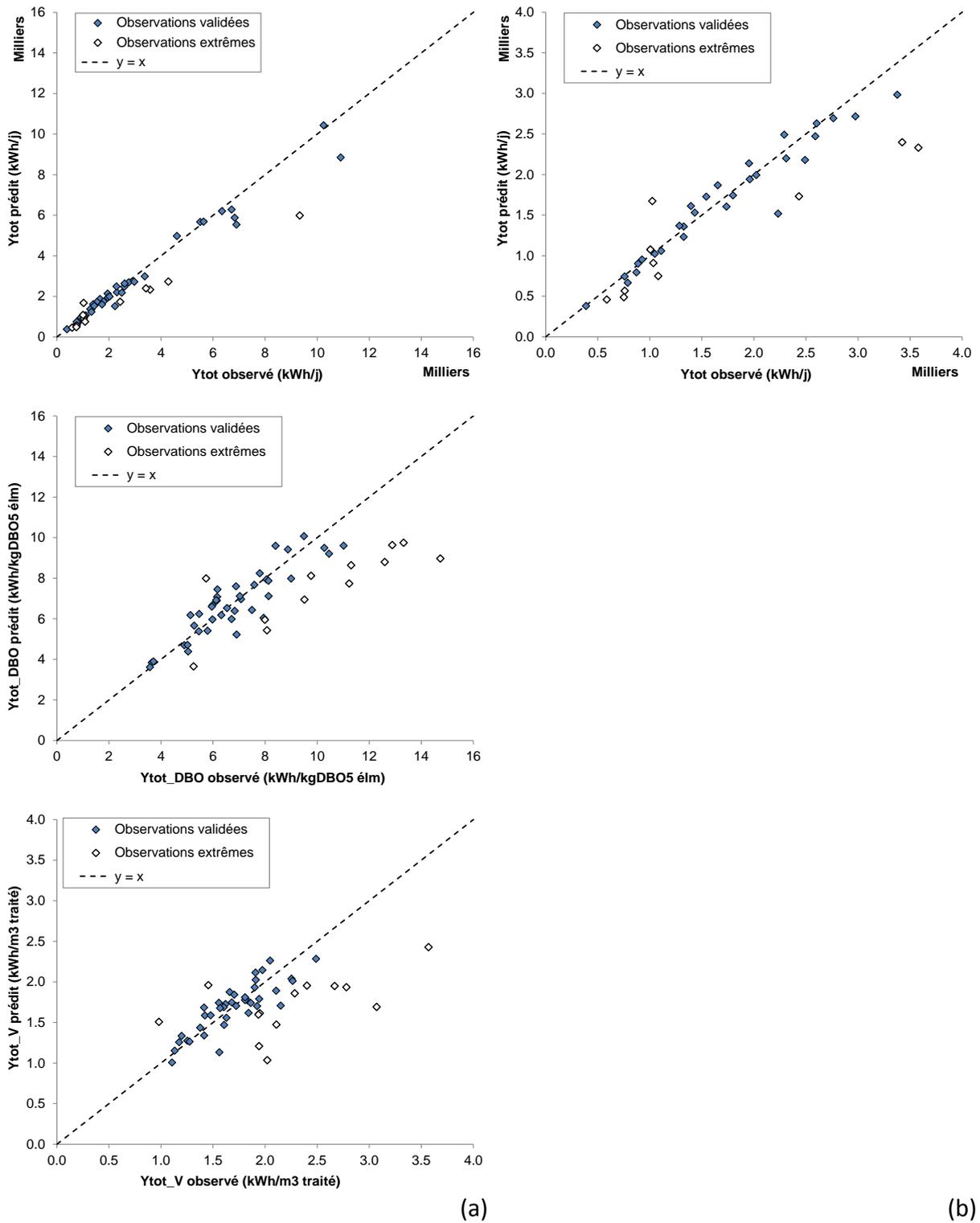


Figure 24. Consommation énergétique des BRM de l'échantillon prédite dans le référentiel DBO₅ en fonction de leur consommation observée (a) plage entière (b) zoom si nécessaire

Annexe 9. Prédiction de la consommation énergétique des BF

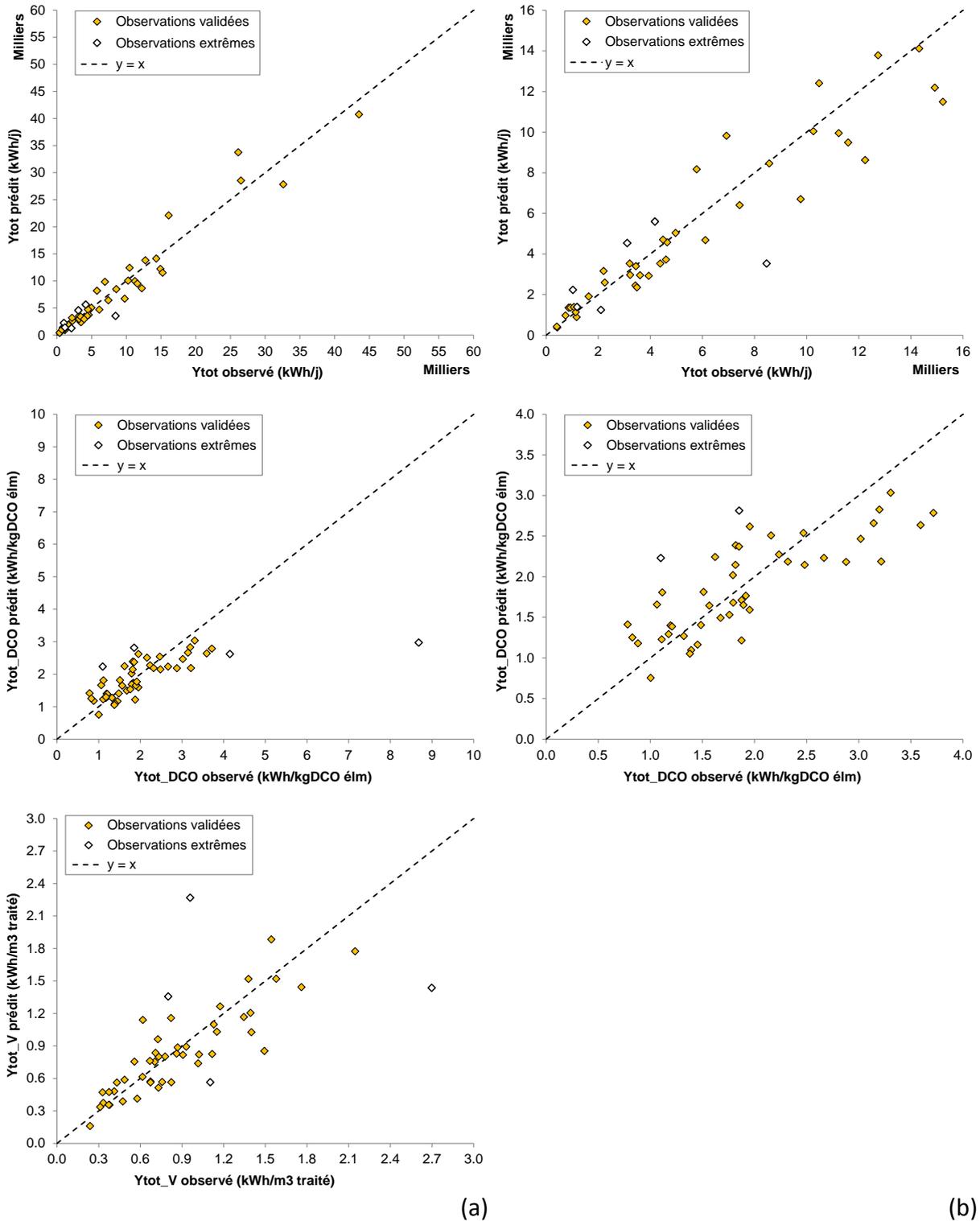


Figure 25. Consommation énergétique des BF de l'échantillon prédite dans le référentiel DCO en fonction de leur consommation observée (a) page entière (b) zoom si nécessaire

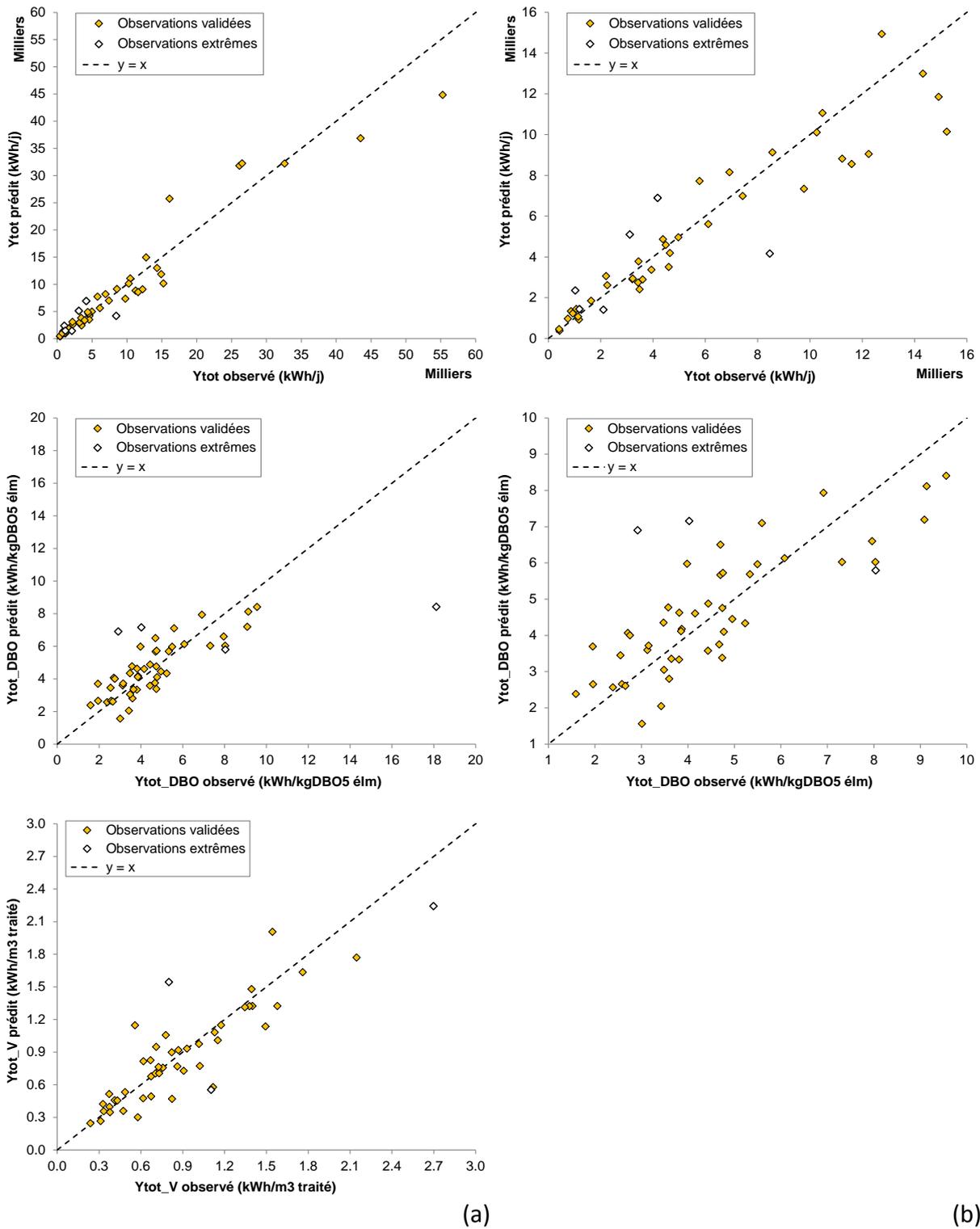


Figure 26. Consommation énergétique des BF de l'échantillon prédite dans le référentiel DBO₅ en fonction de leur consommation observée (a) plage entière (b) zoom si nécessaire

Annexe 10. Eléments d'explication de la consommation énergétique des MBBR

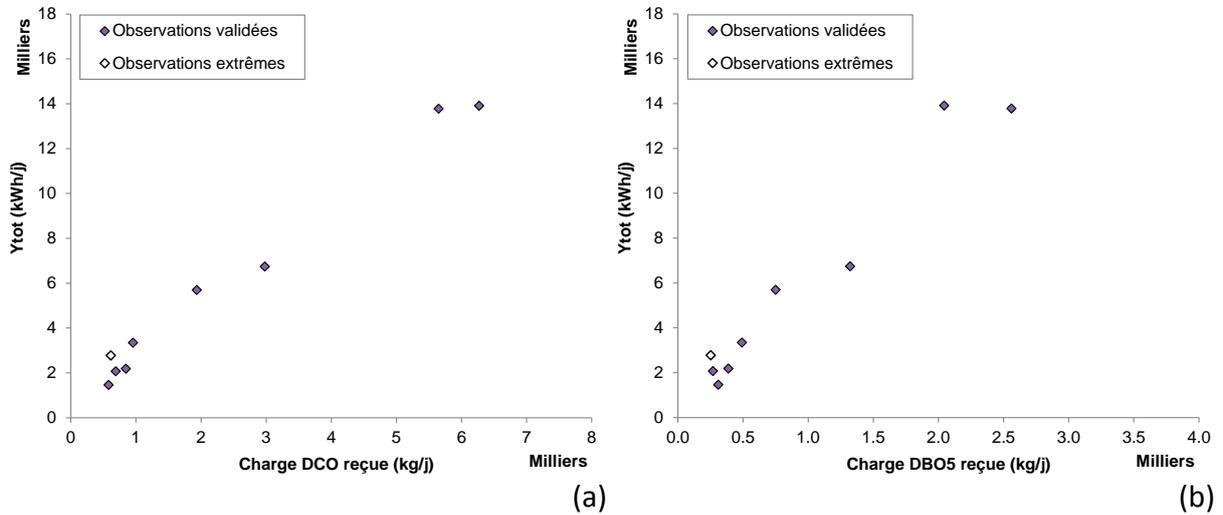


Figure 27. Consommation énergétique Ytot observée sur les MBBR de l'échantillon en fonction de la charge organique reçue (a) dans le référentiel DCO (b) dans le référentiel DBO₅

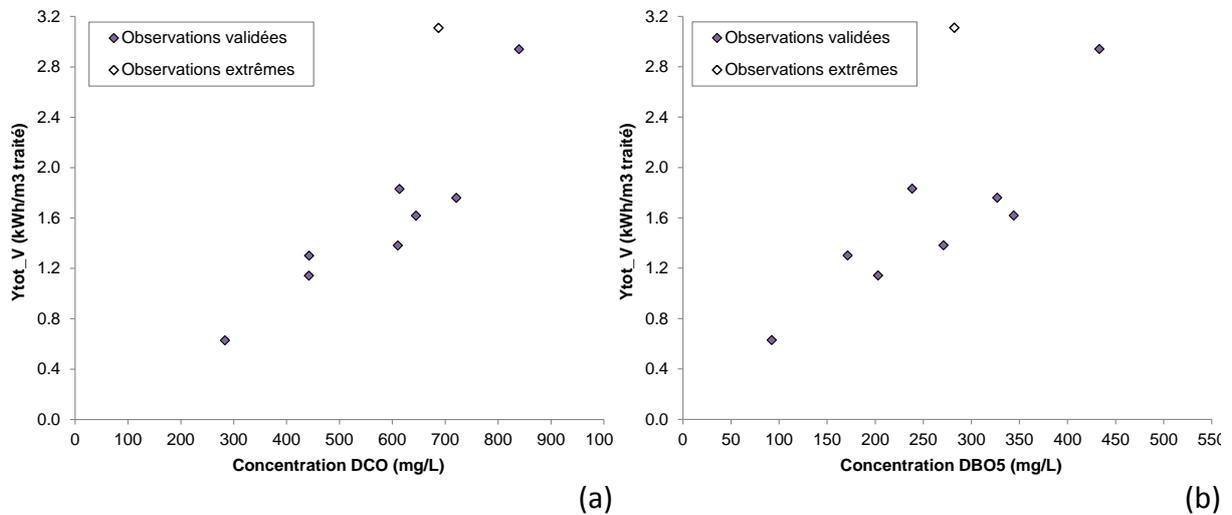


Figure 28. Consommation énergétique Ytot_V observée sur les MBBR de l'échantillon en fonction de la concentration des eaux usées (a) dans le référentiel DCO (b) dans le référentiel DBO₅

Annexe 11. Comparaison des consommations spécifiques en France et à l'étranger

Tableau 36. Comparaison des distributions de Ytot_DBO en France et à l'étranger
pour les trois procédés à culture libre

			Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
			Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Ytot_DBO (kWh/kgDBO5 élm)	BA	ETR	42	85	0.1	1.2	1.9	2.7	9.0	2.2	1.9	2.6	1.59	71%
		FRA	8	162	1.5	2.5	3.1	3.8	6.8	3.3	3.1	3.4	0.97	30%
	SBR	ETR	3	26	1.1	2.2	3.2	4.1	5.8	3.2	2.7	3.6	1.20	37%
		FRA	0	16	2.8	3.4	5.0	5.8	8.2	4.8	4.0	5.7	1.60	32%
	BRM	ETR	47	1						7.1				
		FRA	4	46	3.6	5.5	6.4	7.9	11.0	6.7	6.2	7.2	1.72	25%

Tableau 37. Comparaison des distributions de Ytot_V en France et à l'étranger
pour les trois procédés à culture libre

			Effectif		Résumé de la distribution					Etude de la moyenne				
			Valeurs manquantes	Valeurs disponibles	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Ecart-type (n-1)	Coefficient de variation
Ytot_V (kWh/m3)	BA	ETR	67	65	0.13	0.29	0.39	0.59	1.17	0.46	0.40	0.53	0.25	53%
		FRA	3	167	0.29	0.49	0.63	0.83	1.69	0.70	0.65	0.74	0.29	41%
	SBR	ETR	1	28	0.19	0.44	0.75	0.95	1.49	0.75	0.61	0.89	0.36	48%
		FRA	4	12	0.36	0.83	0.98	1.32	2.01	1.07	0.78	1.36	0.45	41%
	BRM	ETR	6	42	0.33	0.92	1.40	1.97	7.00	1.70	1.30	2.10	1.29	75%
		FRA	3	47	0.84	1.40	1.66	1.91	2.49	1.66	1.54	1.77	0.40	24%

Annexe 12. Données à collecter pour l'analyse détaillée par postes

Les données collectées sur chaque site comprennent d'une part des informations descriptives sur l'installation, ses équipements consommateurs d'énergie et ses points de mesure (Tableau). Une des difficultés majeures est d'obtenir des informations conformes à la réalité, c.à.d. des documents actualisés décrivant l'existant plutôt que des documents prévisionnels.

Tableau 38. Données descriptives à collecter

	Données nécessaires	Données souhaitables si existent
Documents descriptifs	Extraits du marché constructeur :	Extrait du marché exploitation :
	<input type="checkbox"/> Justificatif technique	<input type="checkbox"/> Bilan d'exploitation prévisionnel
	<input type="checkbox"/> Bilan d'exploitation prévisionnel	Descriptif des bâtiments techniques et d'exploitation :
	<input type="checkbox"/> Schémas PID	<input type="checkbox"/> Surfaces et volumes, ou plans
	Vues d'écran de la supervision :	<input type="checkbox"/> Mode chauffage/climatisation et puissances installées
	<input type="checkbox"/> Vues procédé	<input type="checkbox"/> Utilisation et régulation chauffage/climatisation : période de marche, consigne de température,...
	<input type="checkbox"/> Paramétrage des régulations (seuils, taux,...)	
	Documents d'exploitation :	
	<input type="checkbox"/> Notice d'exploitation + annexes	
	<input type="checkbox"/> Manuel d'autosurveillance + annexes	
Caractéristiques des équipements	Inventaire complet et à jour des moteurs	Relevés des plaques signalétiques moteurs :
	<input type="checkbox"/> Intitulé précis	<input type="checkbox"/> Marque et modèle
	<input type="checkbox"/> Fonction, poste, localisation	<input type="checkbox"/> Alimentation (monophasée / triphasée)
	<input type="checkbox"/> Puissance nominale (=utile = installée)	<input type="checkbox"/> Puissance nominale
	<input type="checkbox"/> Monovitesse / bi-vitesse / variateur	<input type="checkbox"/> Intensité, tension, rendement, facteur de puissance (cosφ)
	<input type="checkbox"/> Vitesse ou fréquence utilisée (valeur fixe ou plage)	Mesures effectuées sur les moteurs :
	Spécifications des surpresseurs	<input type="checkbox"/> Puissance absorbée
	<input type="checkbox"/> Fiches de réception	<input type="checkbox"/> Fréquence
		<input type="checkbox"/> Intensité, tension, facteur de puissance

Les données collectées concernent d'autre part le fonctionnement sur une période représentative d'une ou plusieurs années complètes (Tableau).

Tableau 39. Données de fonctionnement à collecter

Pas de temps	Données nécessaires	Données souhaitables si existent
Variable (analyses)	<input type="checkbox"/> Bilans autosurveillance & autocontrôle	<input type="checkbox"/> Dates et description principaux incidents de fonctionnement
	<input type="checkbox"/> Concentrations boues liquides (BA, extraction)	<input type="checkbox"/> Autres concentrations en boues (recirculées, épaissies,...)
	<input type="checkbox"/> Désignation et flux apports extérieurs (vidanges, graisses, sables, boues...)	<input type="checkbox"/> Indices de boues
Journalier (supervision)	<input type="checkbox"/> Débits eau et boues (entrée, tous relevages intermédiaires, by-pass, sortie, extraction,...)	<input type="checkbox"/> Pluviométrie du site
	<input type="checkbox"/> Débits d'air	<input type="checkbox"/> Température air extérieur
	<input type="checkbox"/> Fréquence des appareils avec variateur	<input type="checkbox"/> Paramétrage des régulations (seuils, taux,...)
	<input type="checkbox"/> Temps marche tous équipements	
	<input type="checkbox"/> Relevés tous compteurs énergie	
	<input type="checkbox"/> Température BA (ou eau usée brute)	
Mensuel	<input type="checkbox"/> Factures fournisseur électricité	
	<input type="checkbox"/> Factures fournisseur de combustible	
	<input type="checkbox"/> Bilans d'exploitation	
Annuel	<input type="checkbox"/> Rapport annuel (RAD ou RPQS)	

Annexe 13. Méthodologie de calcul des consommations énergétiques des moteurs électriques

L'énergie consommée par les moteurs est estimée par le produit de la puissance absorbée et du temps de marche ($P_a \times TDM$). La difficulté majeure est de déterminer la puissance absorbée dans les conditions réelles de fonctionnement.

Détermination des puissances absorbées

Il est indispensable de définir les notions et variables des moteurs sur lesquelles reposent les calculs. On ne traitera ici que des moteurs alimentés en triphasé. On peut trouver des moteurs alimentés en monophasé sur les stations, mais leur consommation est généralement négligeable.

Les moteurs triphasés sont composés d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile). Le stator est composé d'enroulements (bobines) qui sont soumis à une tension U et parcourus par un courant I tous deux sinusoïdaux. Par convention, la tension délivrée par un réseau électrique s'écrit V/U où la tension simple V est mesurée entre une phase et le neutre et la tension composée U est celle mesurée entre deux phases. La relation entre ces deux tensions est : $U = \sqrt{3} \cdot V$. En France le réseau triphasé standard est actuellement en 230/400 V (norme CEI 60038).

Définition des puissances pour un moteur triphasé

La **puissance utile ou installée (P_u)**, exprimée en Watt (W), est la puissance **mécanique** délivrée par le moteur sur l'arbre. Elle correspond à la puissance délivrée à l'élément mécanique entraîné (pompe, hélice, vis, ...) en incluant les éventuelles pertes de transmission.

La **puissance absorbée ou consommée (P_a)**, exprimée en W, est la puissance **électrique** que le moteur consomme à ses bornes. Elle est définie par la relation :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot FP$$

avec U la tension composée (en Volts, V), I l'intensité (en Ampères, A) et FP le facteur de puissance (sans unités).

En l'absence de variateurs de fréquence, tension et intensité possèdent un signal sinusoïdal qui est décalé. On note φ l'angle de déphasage entre U et I . Le **facteur de puissance** est alors égal à $\cos\varphi$ et il rend compte de l'efficacité du moteur à consommer la puissance apparente reçue pour fournir un travail. La présence d'un variateur engendre des harmoniques qui distordent les signaux de U et I appliqués au moteur. Le facteur de puissance n'est alors plus égal au $\cos\varphi$ qui rend seulement compte du déphasage entre la tension et l'intensité en amont du variateur. On peut avoir un $\cos\varphi$ élevé et un mauvais facteur de puissance.

Le **rendement (η)** est le rapport entre la puissance utile et absorbée :

$$\eta = P_u/P_a$$

Il caractérise les pertes entre la puissance fournie au moteur et celle qu'il restitue. Il est toujours inférieur à 1. Des pertes de nature thermique (pertes Joules) et magnétiques (pertes fer) se produisent dans le rotor et le stator. Le rotor subit de plus des pertes mécaniques par frottements (entre pièces, avec l'air).

Définition des puissances considérées par le fournisseur d'énergie électrique

Le fournisseur d'électricité considère les trois puissances suivantes :

- La **puissance apparente** notée P_{app} est définie par $P_{app} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ et s'exprime en Volt Ampère (VA). Elle n'a pas de sens physique, mais elle conditionne le dimensionnement des installations du fournisseur d'énergie.
- La **puissance active** notée P_a est égale à la puissance absorbée ($P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$). Elle est transformée par le récepteur pour produire le travail demandé (mouvement pour les moteurs, chaleur pour les résistances, lumière pour les éclairages,...). C'est la consommation facturée par le fournisseur.
- La **puissance réactive** notée P_{reac} est définie par $P_{reac} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$ et s'exprime en Volt Ampère Réactif (VAR). Elle est utilisée pour créer le champ magnétique nécessaire à l'entraînement des moteurs. Les résistances et l'éclairage n'en consomment donc pas ($\varphi = 0$). Elle peut être facturée par le fournisseur au-delà d'un certain seuil du ratio $P_{reac}/P_a = \tan\varphi$.

Ces 3 puissances sont liées par la relation $P_{app}^2 = P_a^2 + P_{reac}^2$ représentée par le triangle des puissances (Figure). On y retrouve également les relations :

$$\cos\varphi = P_a/P_{app}$$

$$\sin\varphi = P_{reac}/P_{app}$$

$$\tan\varphi = P_{reac}/P_a$$

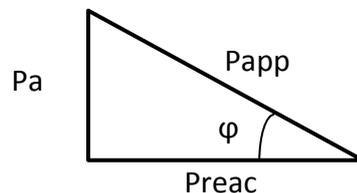


Figure 29. Triangle des puissances en alimentation triphasée

Détermination de la puissance des moteurs en conditions nominales

La **puissance nominale** est la puissance **utile** de l'appareil (P_u, n) en fonctionnement à **pleine charge**. C'est celle qui figure sur la plaque du moteur.

La **puissance absorbée en conditions nominales ($P_{a,n}$)** est la puissance consommée par le moteur à pleine charge et à 50 Hz. Elle n'est jamais indiquée sur les plaques, mais elle peut être **calculée** de deux manières à l'aide des autres indications du fabricant :

$$P_{a,n} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n \quad \text{ou} \quad P_{a,n} = P_{u,n} / \eta_n$$

Or bien souvent, la seule information dont on dispose sur le moteur est $P_{u,n}$. L'étude de documentations de fournisseurs et d'une base de données interne à Irstea rassemblant les caractéristiques complètes de moteurs de sites étudiés avant et pendant cette étude a néanmoins montré qu'il existe des relations entre $P_{u,n}$ et les autres caractéristiques nominales. En particulier, η_n est relié à $P_{u,n}$ par une relation de type exponentiel complexe. Selon l'équation ci-dessus, il suffit de pouvoir estimer η_n en fonction de $P_{u,n}$ pour calculer $P_{a,n}$. On peut utiliser dans ce but les tables du système International Efficiency (IE) qui définissent un rendement minimal en fonction de la puissance nominale. Leur utilisation demande cependant de connaître ou d'estimer le nombre de pôles du moteur et sa date de mise en service.

Détermination de la puissance des moteurs en conditions réelles

Dans la pratique, le moteur fonctionne rarement dans ses conditions nominales, pour deux raisons :

- Le surdimensionnement du moteur par rapport à la demande mécanique de l'élément entraîné. Le Cahier des Clauses Techniques Générales pour la conception et l'exécution d'installations d'épuration des eaux usées (fascicule 81 titre II) impose de prévoir pour les équipements électriques, hors pompes immergées, une puissance nominale au moins égale à la puissance mécanique absorbée dans les conditions d'emploi prévue, majorée d'un facteur de sécurité de 15 %.
- Les conditions réelles de fonctionnement de l'élément entraîné, qui sont généralement différentes de son point de dimensionnement.

Ces deux facteurs déterminent la **puissance utile réelle ($P_{u,r}$)** que le moteur doit fournir sur l'arbre à l'élément entraîné. Le rapport $P_{u,r}/P_{u,n}$ est généralement inférieur à 1, c.à.d que le moteur est sous-chargé. Dans certains cas, on peut aussi trouver des moteurs surchargés ($P_{u,r}/P_{u,n} > 1$).

La **puissance absorbée en conditions réelles ($P_{a,r}$)** dépend de la fréquence d'alimentation et du taux de charge du moteur. La réduction du taux de charge réduit non seulement l'intensité absorbée mais aussi le facteur de puissance. Par conséquent, le ratio $P_{\text{reac}}/P_a (= \tan\varphi)$ du moteur augmente.

C'est bien $P_{a,r}$ qui sera utilisée dans les calculs d'énergie. Elle peut être déterminée par différentes approches, avec des incertitudes croissantes :

- La **mesure sur site** doit être privilégiée ($P_{a,m}$).

- A défaut, la **valeur prévue par le fournisseur dans les conditions réelles** à la station ($P_{a,v}$) peut être retenue. Elle peut figurer dans les documentations techniques accompagnant les offres du fournisseur dans le cadre du marché, surtout pour les appareils puissants comme les surpresseurs. Elle correspond toutefois aux conditions de fonctionnement nominales de la station (pleine charge).
- En dernier recours, $P_{a,r}$ est **estimée à partir de $P_{a,n}$** en intégrant les effets de la charge du moteur et de la fréquence d'alimentation.

Une étude des relations entre puissances absorbées réelles et nominales sur une large base de données de moteurs triphasés a en effet montré qu'on peut approximer $P_{a,r}$ à partir de $P_{a,n}$ par une **relation linéaire**. Par défaut, $P_{a,r} = 0,7 \cdot P_{a,n}$ à 50 Hz, mais ce coefficient peut fortement varier au cas par cas. Les petits moteurs sont souvent très largement dimensionnés ($P_{a,r}/P_{a,n} < 0,7$) car le surcoût d'investissement est négligeable. A l'inverse, les gros moteurs, tels ceux des surpresseurs, sont dimensionnés au plus juste et la puissance absorbée réelle tend alors à se rapprocher de la puissance absorbée nominale ($P_{a,r}/P_{a,n} > 0,7$). Pourtant la tendance n'est pas suffisamment claire, et le meilleur ajustement entre $P_{a,r}$ et $P_{a,n}$ reste la relation linéaire avec une pente de 0,7.

Temps de marche (TDM)

Les TDM de chaque appareil sont considérés au pas de temps journalier, car les valeurs moyennes annuelles peuvent cacher des variations temporelles significatives. On peut distinguer 3 grandes catégories de comportements :

- Les appareils en marche continue (ex : agitateurs, ponts tournants, aération des dessableurs/dégraisseurs) ou asservie en mode cadence-durée (ex : airlift d'extraction des sables) ont des TDM stables (hors incidents).
- Les appareils dont la marche dépend du débit, de la charge et/ou de la température extérieure (pompages, aération, ventilation, chauffage) subissent des variations journalières et saisonnières.
- Les appareils dont la marche est principalement déterminée par la présence humaine à la station (filière boue, désodorisation) suivent les rythmes de travail.

Les variations des TDM des appareils les plus consommateurs (de par leur P_a et/ou leur TDM) doivent être étudiées de manière graphique, afin de détecter les incidents (pannes, renouvellements...) et les modifications de réglages. En effet, ces événements auront une incidence sensible sur le comportement de l'énergie absolue calculée des (sous-)postes concernés.

Annexe 14. Estimation de la puissance absorbée des moteurs à fréquence variable

Selon la théorie, il existe une relation entre la **puissance hydraulique Ph** et le débit ou la fréquence qui peut être approximée par :

- un polynôme de degré 2 pour les pompes volumétriques :

$$\frac{P_{h,f}}{P_{h,50}} = \left(\frac{Q_f}{Q_{50}}\right)^2 = \left(\frac{n_f}{n_{50}}\right)^2 = \left(\frac{f}{50}\right)^2$$

- un polynôme de degré 3 pour les pompes centrifuges :

$$\frac{P_{h,f}}{P_{h,50}} = \left(\frac{Q_f}{Q_{50}}\right)^3 = \left(\frac{n_f}{n_{50}}\right)^3 = \left(\frac{f}{50}\right)^3$$

Si le **rendement global η_g** peut être considéré comme constant sur la plage de fonctionnement utilisée, ces relations sont transposables pour la puissance absorbée $P_{a,r}$.

Cependant les mesures de puissance dont nous disposons montrent que dans bien des cas, une relation linéaire est une approximation acceptable (Figur) :

$$\frac{P_{a,f}}{P_{a,c}} = a_1 \cdot \left(\frac{Q_f}{Q_{50}}\right) + b_1 = a_2 \cdot \left(\frac{n_f}{n_{50}}\right) + b_2 = a_3 \cdot \left(\frac{f}{50}\right) + b_3$$

Q_{50} (m^3/h) correspond soit au débit instantané maximal observé pour un fonctionnement à 50 Hz, soit au débit nominal de la pompe à son point de fonctionnement sur site (documentation fournisseurs, fiches techniques, etc.). Si l'on dispose d'un minimum de 3 points de mesures à 3 fréquences différentes, les coefficients a et b de chaque moteur peuvent être déterminées dans un tableur par ajustement graphique ou par optimisation numérique (solveur).

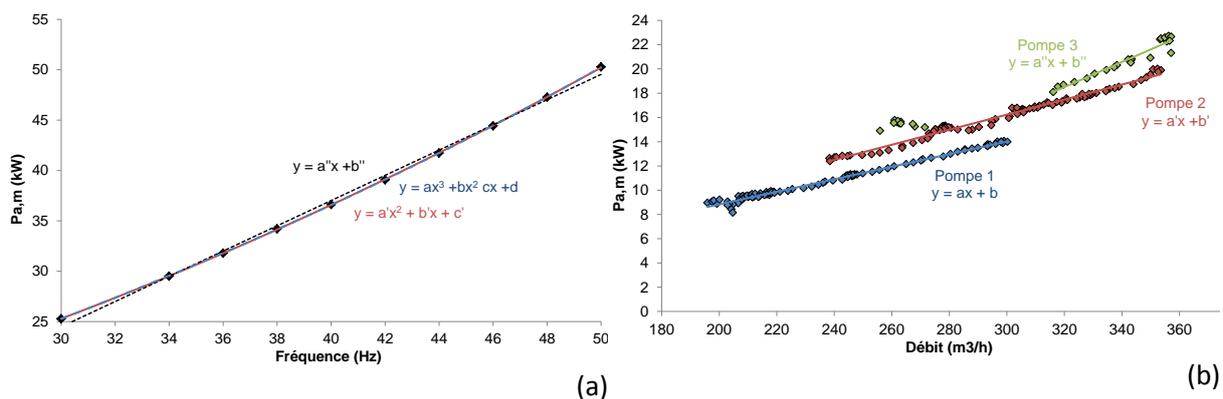


Figure 30. Exemples de relation linéaire et polynomiale pour estimer la puissance absorbée réelle en fonction de la fréquence ou du débit (a) surpresseur volumétrique (b) pompes centrifuges

Annexe 15. Estimation de la consommation du local d'exploitation

Les équipements du local d'exploitation sont rarement inventoriés et leurs temps de marche ne sont jamais enregistrés. De plus, ces appareils sont majoritairement alimentés en monophasé. Dans de rares cas, la consommation de ce poste est mesurée par un compteur divisionnaire dédié. A défaut, on peut estimer sa consommation avec la démarche proposée ci-dessous.

Classiquement on distingue les 5 usages suivants dans le secteur du bâtiment (audits, réglementation thermique,...) :

- chauffage ;
- climatisation ;
- eau chaude sanitaire ;
- éclairage ;
- ventilation.

Pour une STATION D'ÉPURATION, il faut rajouter le matériel de bureautique, de laboratoire, et l'électroménager (cuisine, lave-linge,...).

La consommation énergétique est la somme de l'énergie pour le **chauffage** et la **climatisation** éventuelle, dont le fonctionnement est fortement saisonnier, et d'une ligne de base regroupant les **autres usages**, qui sont plus ou moins réguliers toute l'année. Il s'agit donc d'estimer au mieux ces trois sous-postes à partir des données disponibles.

Autres usages

La ligne de base inclut les usages suivants : eau chaude, éclairage, ventilation, matériel de bureautique, matériel de laboratoire, électroménager. Les données à collecter dans l'idéal sont : un inventaire des principaux appareils, la surface et l'usage de chaque pièce, les effectifs de personnel en équivalents temps plein (ETP) et leur rythme de travail. La consommation de chacun des usages est alors estimée par l'une des approches suivantes :

- Calcul déterministe par équipement, à partir des puissances et des temps de marche ($P_a \times TDM$), lorsque ces deux variables sont connues ou estimés ;
- Consommation forfaitaire annuelle par équipement. Elle peut être estimée ou donnée par le fournisseur des appareils ;
- Consommation spécifique multipliée par son unité fonctionnelle. Cela peut concerner l'éclairage et la ventilation, avec des ratios rapportés à la surface des pièces, et l'eau chaude sanitaire, avec des ratios rapportés aux ETP. Les ratios de consommation spécifique peuvent provenir de la bibliographie sur les bâtiments ou être estimés à partir

d'informations commerciales. Les ratios pour l'éclairage et la ventilation peuvent dépendre de l'usage des pièces.

Certains de ces usages ont une consommation constante au cours du temps (ex : ventilation mécanique, réfrigérateur), mais la plupart présentent des variations hebdomadaires liées aux rythmes de travail et des variations saisonnières liées à l'ensoleillement (éclairage). Si le rythme de présence de personnel sur la station est connu et bien caractérisé, on peut développer une fonction double, dont les termes sont modulés par un facteur présence/absence. A défaut, on estime une constante journalière calculée à partir d'un nombre d'heures de présence annualisées équivalent au temps de travail officiel, soit 1607 h/an.

Chauffage et climatisation

La régulation thermique représente souvent la fraction prédominante de la consommation du bâtiment d'exploitation. Elle présente une forte variabilité saisonnière, qui doit être considérée dans les calculs lorsqu'ils sont effectués au pas de temps journalier ou mensuel. La variable déterminante sur ce sous-poste est la température de l'air extérieur (moyenne jour, ou à défaut moyenne entre min et max). Le seuil de mise en route du **chauffage** semble se situer vers 18°C. C'est inférieur à la température maintenue à l'intérieur (20-22°C), mais ce décalage s'explique par l'existence d'une énergie de chauffage gratuite (pertes thermiques des appareils autres que chauffage, et chaleur humaine). Ce seuil est confirmé par la notion de degrés jour unifiés (DJU), aussi appelé « base 18 » utilisée en audit énergétique. Le degré jour de chauffe est défini par le nombre de jours où $18 - T_{\text{ext}} > 0$.

En présence de **climatisation**, on peut supposer, sauf indication plus précise de l'exploitant, qu'elle prend le relais du chauffage pour assurer toute l'année une température de consigne. Ceci rejoint la notion de degré jour de réfrigération, définie par le nombre de jours où $18 - T_{\text{ext}} < 0$.

Les consommations du chauffage et de la climatisation peuvent alors être estimées chacune par une fonction en 3 parties. Dans le cas du chauffage, illustré en Figure , la consommation journalière E_{chauf} s'écrit alors de la manière suivante :

$$T_{\text{ext}} < T_{\text{ext,min}} \Rightarrow E_{\text{chauf}} = E_{\text{chauf,max}}$$

$$T_{\text{ext,min}} < T_{\text{ext}} < 18 \Rightarrow E_{\text{chauf}} = [a (18 - T_{\text{ext}})^3 + b (18 - T_{\text{ext}})^2 + c (18 - T_{\text{ext}}) \text{ ou } a (18 - T_{\text{ext}})] \cdot S_{\text{chauf}}$$

$$T_{\text{ext}} > 18 \Rightarrow E_{\text{chauf}} = 0$$

La difficulté consiste donc à déterminer les coefficients de la fonction centrale, qui est un polynôme du 3^e degré, ou pour simplifier, une fonction linéaire. Les coefficients (a, b, c) dépendent des facteurs suivants :

- date de construction du bâtiment, et norme énergétique appliquée ;
- mode de chauffage ;

- isolation du bâtiment ;
- présence ou non de régulation (jour/nuit, semaine/WE, température de consigne) ;
- sensibilité de l'exploitant aux gestes d'économie.

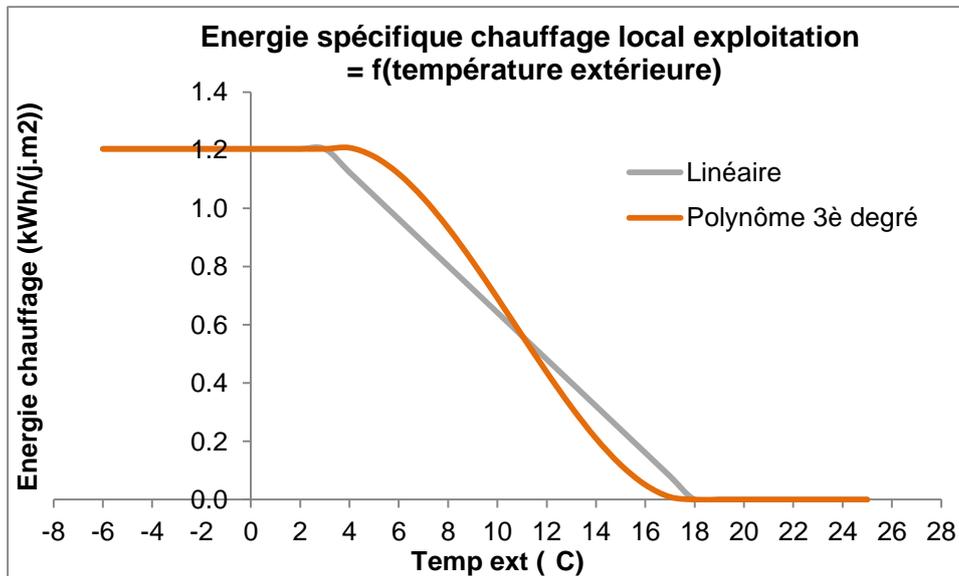


Figure 31 : Allure de la consommation spécifique du chauffage en fonction de la température moyenne de l'air extérieur

On peut utiliser l'information suivante pour caler les 3 coefficients :

- dans quelques cas, il existe un compteur divisionnaire dédié au local d'exploitation ;
- lorsque l'énergie du compteur général a été entièrement validée par ailleurs, on peut étudier la possibilité d'affecter toute la différence résiduelle entre les calculs et le compteur au local d'exploitation. Il faut tracer cette différence en fonction de la température extérieure et voir si une corrélation nette apparaît.

Dans les deux cas, il faut :

- déduire la consommation des autres usages (cf. paragraphe précédent), afin d'isoler la consommation liée au chauffage seul ;
- vérifier que le résultat annuel est plausible, en calculant la consommation énergétique spécifique résultante en kWh/(m².an) et en la confrontant aux valeurs rapportées pour le chauffage des bâtiments (50 à 250 kWh/(m².an) suivant la norme de construction).

Annexe 16. Références de consommations spécifiques par postes

Sous postes Eau

La seule référence trouvée rapporte des mesures réalisées sur une centaine d'individus en Allemagne (DWA, 2013) pour les sous-postes **relevage** et **aération biologique**. Les données sur le relevage proviennent en fait de postes de relevage de réseaux d'assainissement, et non de STATION D'ÉPURATION. Faute de mieux, ces valeurs peuvent être pertinentes pour le relevage en tête de station. L'unité fonctionnelle utilisée par la DWA (2013) est une combinaison du volume et de la hauteur manométrique totale ($m^3.mCE$). Cela fait sens physiquement, mais de l'aveu même des auteurs, les données de hauteur manométrique font souvent défaut. La distribution des données rapportées est résumée avec des boîtes à moustache :

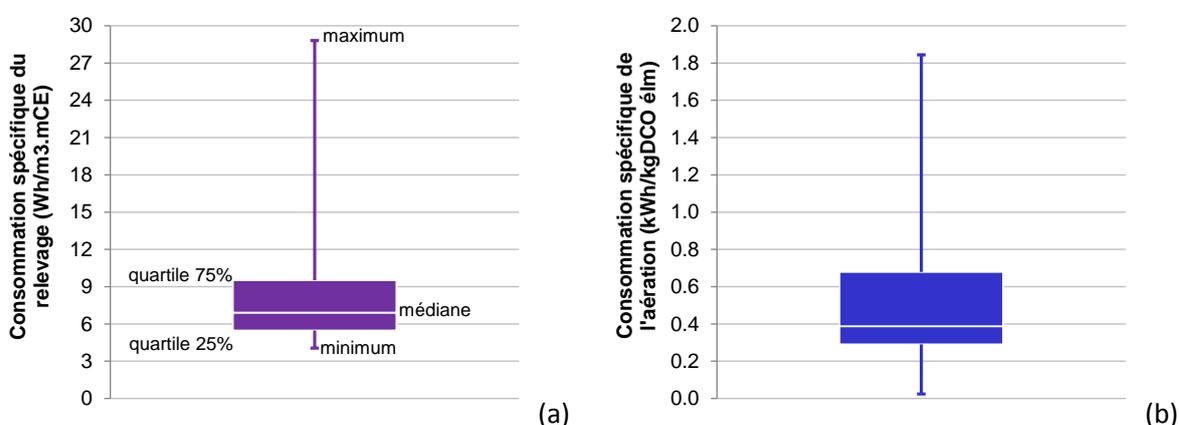


Figure 32. Référence de consommation spécifique pour les sous-postes
(a) relevage (102 postes de relevage sur réseau) (b) aération biologique (111 STATION D'ÉPURATION)

Sous postes Boues

Des références d'origine française ont été trouvées pour la plupart des sous-postes de la filière Boues, avec une distinction selon les technologies et selon le type d'énergie (électrique ou thermique). Le nombre d'observations est trop faible pour effectuer des statistiques même descriptives. Le corps des boîtes ci-dessous présente donc plutôt une "gamme usuelle", qui correspond à la zone de recoupement des différentes sources, et les moustaches représentent les extrêmes (min et max).

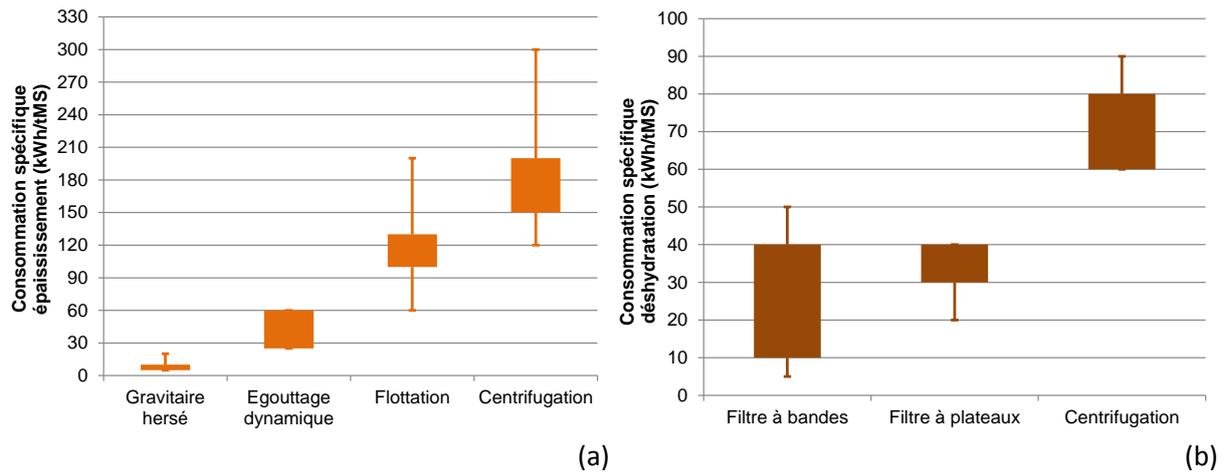


Figure 33. Références de consommation spécifique pour les sous-postes de la filière boues
(a) épaisseur (b) déshydratation (après épaisseur)

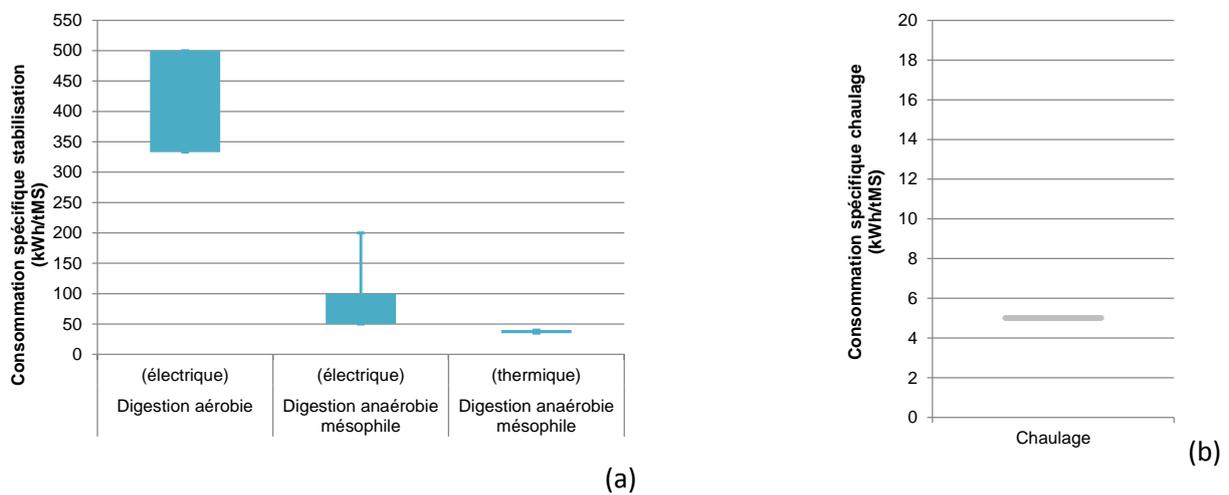


Figure 34. Références de consommation spécifique pour les sous-postes de la filière boues
(a) digestion (b) chaulage

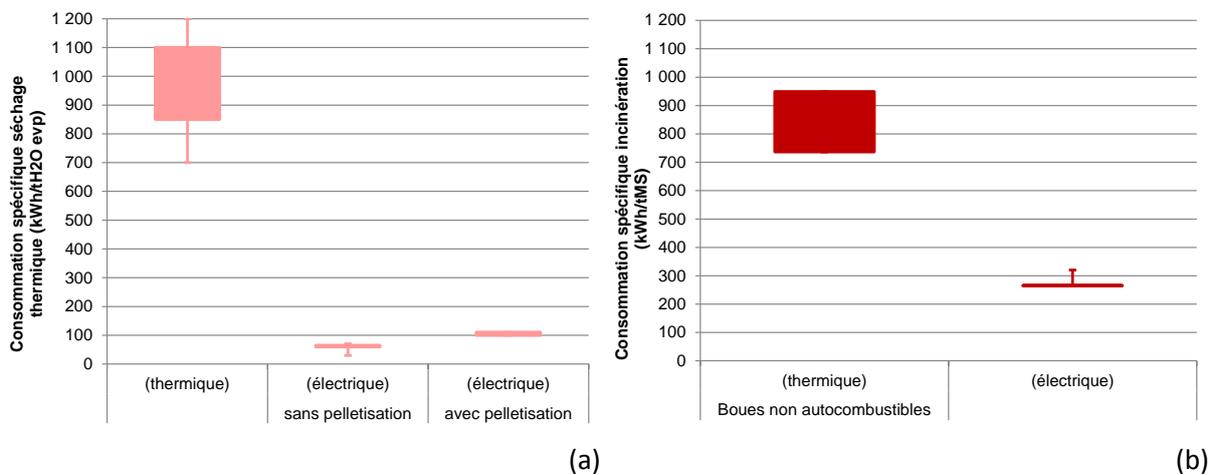


Figure 35. Références de consommation spécifique pour les sous-postes de la filière boues
(a) séchage thermique (b) incinération

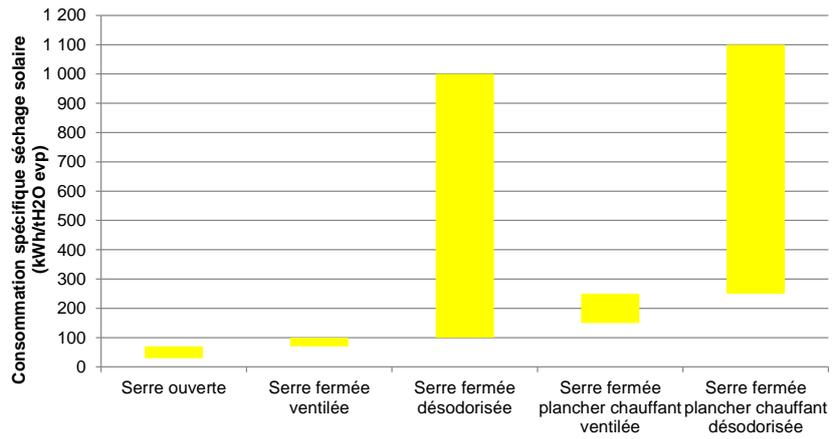


Figure 36. Référence de consommation spécifique pour le sous-poste séchage solaire

Poste Local d'exploitation

Ce graphique résume la gamme usuelle et les extrêmes rapportés pour des locaux à usage de bureaux dans quelques pays européens (France, Allemagne, Belgique, Espagne, Royaume-Uni).

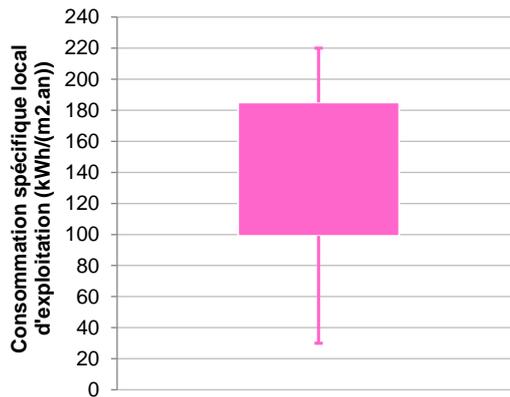


Figure 37. Référence de consommation spécifique pour le poste Local d'exploitation