

Ernst A. Müller
Rolf Thommen
Peter Stähli

L'énergie dans les stations d'épuration

Mandants

Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Office fédéral des questions conjoncturelles (OFQC)

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)



2000

Ernst A. Müller
Rolf Thommen
Peter Stähli

L'énergie dans les stations d'épuration

Mandants

OFEN Office fédéral de l'énergie
OFQC Office fédéral des questions conjoncturelles
OFEFP Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage

Dans le cadre du programme Energie 2000 et PACER, le présent manuel a fait l'objet d'un résumé également intitulé "L'énergie dans les stations d'épuration."

L'énergie dans les stations d'épuration

„Résumé“

Commande: OFEFP, Service de documentation, 3003 Berne

ISBN 3-905251-26-4
Edition originale ISBN 3-905 232-49-9

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles,
3003 Berne, 1996.

Reproduction d'extraits autorisée moyennant l'indication
de la source.

A commander à l'office central fédéral des imprimés et
du matériel, 3000 Berne

Form 724.239 f 5.96 800

Auteurs

Ernst A. Müller, chef de projet
CUB. 8001 Zurich

Rolf Thommen
Thomas Kohler
Max Schachtler
Martin Anderson
Holinger AG, 3000 Berne 21

Peter Stähli
Dieter Bühler
K. Schweizer AG, 4021 Bâle

Experts
Benjamin Mörgeli, aqua-System ag,
8407 Winterthour
Jürg Nipkow, ARENA, 8006 Zurich

Coordination rédactionnelle
Arthur Wellinger, INFOENERGIE,
8356 Ettenhausen

Rédaction finale
Martin Kernen, Planair, 2314 La Sagne
Jean-Claude Scheder. 1038 Bercher

Traduction
Françoise de Coulon, 1084 Carrouge

Graphisme, composition et impression
Joerg Kretz, 8357 Guntershausen

Suivi du projet
Daniel Becher, OFEFP
Hans Ulrich Schärer, OFEN
Arthur Wellinger, PACER

Préface

Les stations d'épuration des eaux usées sont à la fois d'importantes productrices et consommatrices d'énergie: elles produisent en effet du gaz de digestion, agent énergétique renouvelable, mais utilisent environ un cinquième de l'électricité consommée dans les bâtiments et installations communaux. Les frais engendrés par cette consommation représentent en moyenne 18% des coûts d'exploitation. Une raison amplement suffisante, donc, pour que l'exploitant de la STEP comme ses usagers voient d'un bon œil les possibilités d'optimisation énergétique qu'elle présente.

Dans un nombre croissant de stations d'épuration, plusieurs composantes arrivent au terme de leur durée d'utilisation et doivent être remplacées à plus ou moins court terme. En outre, certaines stations seront bientôt pourvues d'un dispositif d'épuration plus perfectionné. Ces travaux le plus souvent fort coûteux offrent l'occasion non seulement d'adapter la qualité de l'épuration aux exigences actuelles, mais aussi d'optimiser la consommation d'énergie en vue d'abaisser les coûts d'exploitation.

Forts de ce constat, l'office fédéral de l'énergie (OFEN), l'office fédéral des questions conjoncturelles (OFQC) et l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) ont mis au point un programme coordonné: „Energie 2000“, „PACER“ et la section Evaluation des eaux usées de l'OFEFP ont mandaté des spécialistes afin qu'ils élaborent les bases nécessaires à une optimisation énergétique des STEP.

Les auteurs du présent manuel sont des spécialistes de longue date en matière de traitement des eaux usées. Utilisé comme support de cours par l'Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA), il offre de solides connaissances de base à toutes les personnes chargées d'élaborer plans ou projets de stations d'épuration. Nul doute qu'il contribuera grandement à l'établissement de nouvelles normes en matière d'épuration des eaux, aux côtés des analyses détaillées publiées par PACER et du programme d'application assisté par ordinateur conçu pour effectuer ces analyses.

Nous espérons vivement que les lecteurs de cet ouvrage y trouveront matière à approfondir leurs connaissances, ainsi qu'à acquérir motivation et savoir-faires afin que le plus grand nombre possible de stations d'épuration fassent l'objet d'une optimisation énergétique.

Les trois offices fédéraux
OFEN, OFQC et OFEFP

Table des matières

	pages
1. Guide d'utilisation et de mise en pratique	1
1.1 Introduction	2
1.2 Mode d'emploi	5
1.3 L'optimisation énergétique	6
1.4 Investissement et financement	9
1.5 Économies d'énergie réalisables dans les STEP de Suisse	11
2. La consommation énergétique des STEP	15
2.1 La consommation énergétique	16
2.2 Les composantes	21
2.3 L'épuration des eaux	28
2.4 Le traitement des boues	41
2.5 L'infrastructure	54
3. Les économies d'énergie au niveau technique	57
3.1 introduction	58
3.2. Le réseau de canalisations	59
3.3 Le dimensionnement des STEP	60
3.4 Les stations de relevage et de pompage	62
3.5 L'installation à boues activées	66
3.6 La filtration	78
3.7 Le traitement des boues	80
3.8 L'infrastructure	88
3.9 Tableaux synoptiques des mesures à prendre	92
4. Mesures d'économie d'énergie électrique	99
4.1 Introduction	100
4.2 Les systèmes d'entraînement	102
4.3 Les systèmes de commande et de régulation	118
4.4 Les autres consommateurs d'électricité: économies réalisables	128
4.5 Tableaux synoptiques des mesures à prendre	130
5. Mesures d'économie d'énergie thermique	133
5.1 Introduction	134
5.2 L'énergie de production	136
5.3 Le chauffage des bâtiments	144
5.4 Les producteurs de chaleur classiques	146
5.5 Tableaux synoptiques des mesures à prendre	147



	pages
6. Utilisation des gaz de digestion, de l'énergie solaire et de l'énergie thermique contenue dans les eaux usées	149
6.1 Les agents énergétiques disponibles dans les STEP	151
6.2 Le gaz de digestion	152
6.3 L'énergie solaire	165
6.4 L'énergie thermique contenue dans les eaux usées	167
7. Instruments de travail	171
7.1 Introduction	172
7.2 L'analyse sommaire	177
7.3 L'analyse détaillée	180
7.4 Le cahier des charges et le calcul de rentabilité	190
7.5 Les critères d'évaluation énergétique	196
Annexes	207
A1 Définitions et abréviations	208
A2 Unités d'énergie et conversion	214
A3 La technique des procédés	217
A4 Dispositions légales	226
A5 Cahier des charges	228
Bibliographie	241

1 , Guide d'utilisation et de mise en pratique

	pages
1.1 Introduction	2
- Le pourquoi et le comment des économies d'énergie	2
- Les acteurs de l'optimisation énergétique	2
- Les destinataires du manuel	3
- Le cadre du manuel	4
1.2 Mode d'emploi	5
- Structure	5
- Lecture	5
1.3 L'optimisation énergétique:	6
- Le maître de l'ouvrage et le détenteur de STEP: personnage-clé et élément moteur	6
- Analyse sommaire et analyse détaillée	7
- Le temps c'est de l'argent	7
- Critères de décision	8
- Mesures d'économie d'énergie concrètes	8
1.4 Investissement et financement	9
- Ordre de grandeur des investissements énergétiques	9
- Financement par les taxes d'épuration: le principe pollueur-payeur	10
1.5 Économies d'énergie réalisables dans les STEP de Suisse	11
- Possibilités d'économies à long terme	11
- Part d'énergie électrique et thermique pouvant être économisée	11
- Economies réalisables grâce aux agents énergétiques renouvelables	12
- Bilan total	13

1 1 Introduction

Le pourquoi et le comment des économies d'énergie

Lorsque la plupart des stations d'épuration des eaux usées, la question des économies d'énergie n'entra pas en ligne de comptes car, d'une part, les prix étaient nettement inférieurs et, d'autre part, la pollution de l'air, l'effet de serre et les risques générés par les centrales électriques ne posaient pas encore problème. Au fil des décennies, toutefois, la situation n'a cessé de se dégrader, au point que des mesures sont aujourd'hui devenues impératives.

Les communes doivent à cet égard montrer l'exemple en réduisant la consommation énergétique de leurs bâtiments et installations. Les STEP, qui comptent parmi les objets communaux consommant le plus d'électricité, se prêtent particulièrement bien à l'optimisation énergétique, car il est possible de réaliser des économies à de nombreux niveaux.

Des efforts ont certes déjà été accomplis dans de nombreuses STEP, où l'on utilise désormais des ampoules économiques et où l'on a remplacé les moteurs existants par des machines de rendement plus élevé ou encore construit des installations de couplage chaleur-force (CCF). Mais ce ne sont là que des mesures isolées. Or, il est possible d'économiser dans bien d'autres domaines. C'est pourquoi il convient de procéder à une évaluation systématique de la consommation de tous les appareils. Le moment ne saurait être mieux choisi, car la grande majorité des exploitants vont devoir, ces prochaines années, entreprendre de gros travaux, que

ce soit pour rénover leurs équipements ou pour accroître la capacité d'épuration de leur STEP.

Les acteurs de l'optimisation énergétique

Les éléments consommant de l'énergie aux divers stades de l'épuration étant étroitement imbriqués, il importe qu'une étroite collaboration s'instaure entre les spécialistes de ces différents domaines lorsqu'il s'agit de rénover, d'agrandir ou de transformer une STEP en vue d'une optimisation énergétique.

Il ne suffit toutefois pas d'optimiser la consommation énergétique d'une STEP: encore faut-il qu'elle soit ensuite exploitée de façon appropriée par le détenteur et ses employés. A cette fin, il convient qu'ils connaissent parfaitement les différents processus de l'épuration et la consommation d'énergie requise par chacun d'eux, ainsi que les techniques mises en œuvre pour réaliser des économies. Il appartient au maître de l'ouvrage mandaté par une commune de décider des mesures à prendre et de se prononcer sur le montant des investissements.

Les pouvoirs publics peuvent apporter une contribution financière au maître de l'ouvrage, au détenteur de l'installation et aux ingénieurs spécialisés. Ils peuvent en outre mettre sur pied des cours à leur intention et poser des conditions-cadres à l'optimisation énergétique.

Objectif du manuel:
aider et conseiller
les différents
acteurs dans leur
tâche afin qu'ils
puissent procéder
à une optimisation
énergétique
globale tout
en respectant les
exigences liées aux
eaux usées.



Illustration I-I
Acteurs intervenant dans l'optimisation énergétique d'une STEP

Derniers acteurs, enfin: les fabricants d'installations, de machines et d'appareils, auxquels revient la tâche de développer des produits consommant le moins d'énergie possible.

Les destinataires du manuel

Le manuel s'adresse avant tout aux ingénieurs chargés de planifier les rénovations, agrandissements, transformations et constructions de STEP, puis d'en superviser l'exécution. Ils y trouveront:

- des renseignements techniques
 - des exemples pratiques
 - une marche à suivre systématique
 - des outils de travail efficaces.
- Quant aux maîtres d'ouvrage bénéficiant d'une formation d'ingénieur, ils pourront, grâce à cet ouvrage:
- acquérir une bonne vue d'ensemble des économies d'énergie réalisables:
 - planifier les différentes étapes de leur intervention;

- examiner les analyses énergétiques effectuées par les spécialistes;
- décider des investissements en connaissance de cause.

Le présent manuel est en outre utilisé comme support de cours par l'Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA), qui organise des cours à l'intention du personnel employé dans les stations d'épuration [1 , 2]. Les détenteurs de STEP, pour leur part, pourront approfondir leurs connaissances en matière d'énergie et apprendront comment améliorer l'exploitation de leur installation, ce qui leur permettra:

- de proposer des mesures d'économie d'énergie
- de déceler les déficits énergétiques
- de susciter une optimisation de leur installation.

Principaux destinataires: les ingénieurs de projets.



Le cadre du manuel

Le présent manuel traite exclusivement de la consommation énergétique des STEP. Les auteurs sont partis du principe que les spécialistes auxquels il s'adresse ont les connaissances de base suffisantes dans leur domaine respectif, qu'il s'agisse de planification énergétique, d'énergie électrique et thermique, de production d'énergie, de commande et de régulation ou de traitement des eaux usées et des boues. Pour ce qui est de la question purement énergétique, il est conseillé de se reporter aux ouvrages cités dans la bibliographie [3, 4], aux Recommandations de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA 380/1 et 380/4 [5, 6]), ainsi qu'aux publications et cours RAVEL [7].

Le manuel prend en compte les types les plus courants de stations d'épuration actuellement exploitées en Suisse. Les cas spéciaux, de même que les installations industrielles particulières n'y sont donc pas abordés.

Les procédures et procédés décrits se limitent à l'enceinte de la STEP. Celle-ci varie toutefois selon la station. Ainsi, le bassin de décantation des eaux de pluie se trouve à l'intérieur pour l'une et à l'extérieur pour l'autre, raison pour laquelle il est ici pris en compte. En revanche, deux sujets ne sont pas approfondis. Il s'agit du traitement des boues qui, dans les grandes installations, n'est pas effectué à l'intérieur de la STEP [8], et de l'énergie thermique que contiennent les eaux usées et qui est utilisée pour chauffer les bâtiments situés aux environs des STEP [9, 10, 11, 12].

1 .2 Mode d'emploi

Structure

Le chapitre 1 permettra aux maîtres d'ouvrage de se faire une première idée du sujet avant de se reporter au chapitre 7 pour y découvrir les principaux instruments de travail (cahier des charges, procédures, etc.). Le chapitre 2 est consacré aux consommateurs d'énergie d'une STEP. Quant aux chapitres 3 à 6, ils traitent des différents domaines liés à la question énergétique. Chaque spécialiste pourra ainsi approfondir ses connaissances, mais également se familiariser avec des secteurs autres que le sien.

Ces quatre chapitres comportent une foule d'exemples de calculs effectués, autant que possible, sur la base de l'installation modèle décrite au chapitre 2.2 et à l'annexe A3.1. En conclusion des chapitres 3 et 4, un tableau reprend sous forme de liste les mesures d'économie d'énergie décrites dans les deux chapitres.

Lecture

Les destinataires étant des spécialistes de différents domaines, les uns ou les autres trouveront inévitablement certains éléments trop peu détaillés. En pareil cas, ils se reporteront à la littérature spécialisée recensée dans la bibliographie. Inversement, ils n'hésiteront pas à sauter les passages traitant de données qui leur sont connues et à procéder à une sélection au gré de leurs besoins.

Feuilletez et vous trouverez ce qu'il vous faut.

Aperçu:	
Chap. 1:	Introduction
Chap. 2:	Les principaux consommateurs d'énergie
Approfondissement des connaissances:	
Chap. 3:	Épuration des eaux et traitement des boues
Chap. 4:	Énergie électrique
Chap. 5:	Énergie thermique
Chap. 6:	Utilisation du gaz de digestion, de l'énergie solaire et de l'énergie thermique contenue dans les eaux usées
Utilisation des instruments de travail:	
Chap. 7:	Les instruments de travail

Tableau 1-2 Structure du manuel

1.3 L'optimisation énergétique: marche à suivre

Le maître de l'ouvrage et le détenteur de STEP: personnage clé et élément moteur

Pour abaisser les coûts d'exploitation et réaliser les objectifs dictés par la politique énergétique, les communes doivent

en premier lieu optimiser la consommation énergétique de leurs bâtiments, installations et véhicules. Le problème des stations d'épuration doit être traité en priorité, car elles consomment à elles seules près d'un dixième de la consommation d'électricité totale des communes.

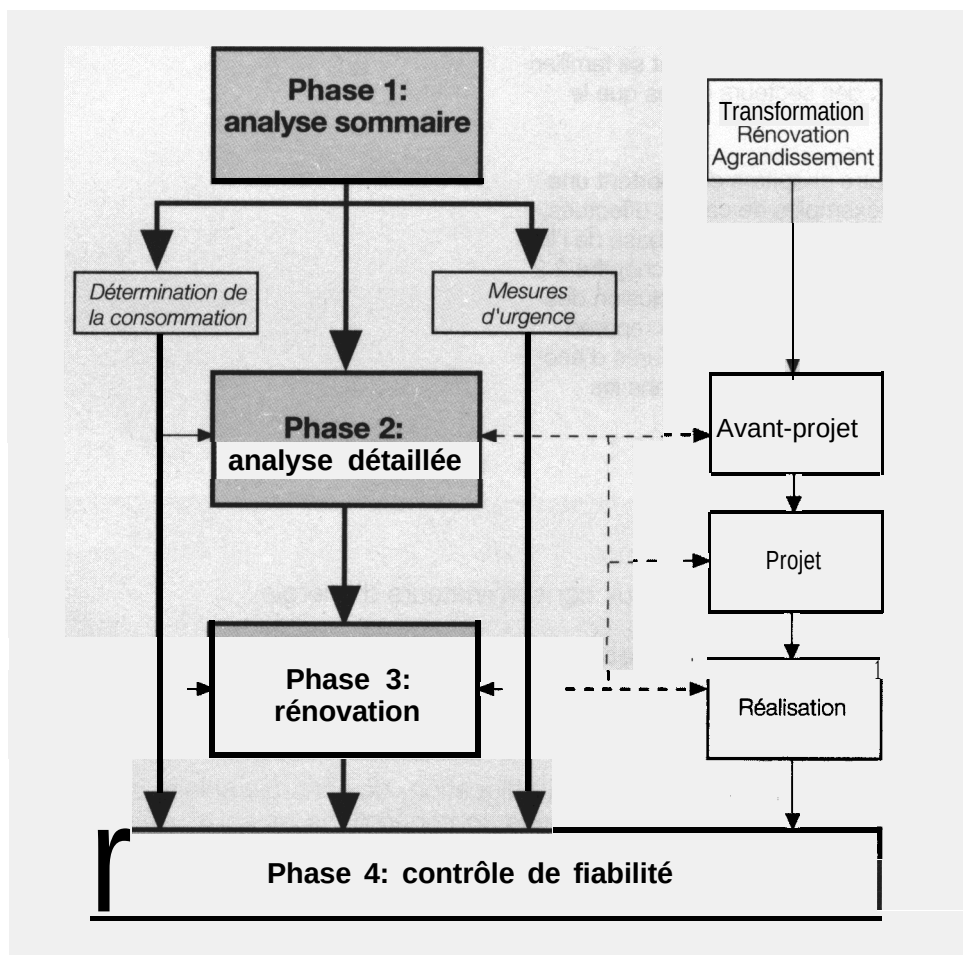


Illustration 1-3
Procédure systématique dans une STEP existante

Pour mener à bien une optimisation énergétique, le maître de l'ouvrage doit procéder de façon systématique (cf. illustration 1-3), afin de pouvoir planifier l'enchaînement des étapes nécessaires et de confier les mandats y relatifs en conséquence.

Le détenteur de STEP est le mieux à même de déterminer le degré d'urgence des différentes interventions nécessitées par les déficits énergétiques qu'il observe et, partant, d'inciter la commune à procéder à une optimisation énergétique.

Analyse sommaire et analyse détaillée

La première étape consiste à effectuer une analyse sommaire - peu coûteuse - afin d'évaluer la qualité énergétique de la STEP et le degré d'urgence des étapes ultérieures. Le maître de l'ouvrage choisit alors de procéder ou non à une analyse plus détaillée, mais aussi plus coûteuse, qui fournit des indications précises sur les mesures d'économie d'énergie réalisables, sur leurs coûts et sur la rentabilité de la STEP après leur mise en œuvre. Il a désormais tous les éléments nécessaires pour prendre sa décision. Une fois exécutées, les mesures doivent faire l'objet d'un contrôle de fiabilité.

Si la rénovation porte sur des composantes importantes de la STEP, il est inutile de procéder à une analyse sommaire. Le maître de l'ouvrage mandate alors directement un spécialiste afin qu'il effectue une analyse détaillée. A l'heure

actuelle, les cantons de Schaffhouse, Thurgovie, Argovie [13] et Zurich [14] ont d'ores et déjà procédé à des analyses sommaires de leurs stations d'épuration.

Le temps, c'est de l'argent

Une analyse détaillée est indispensable des lors que la rénovation porte sur une composante importante. Elle ne doit toutefois pas se limiter à cette dernière, mais passer en revue tous les éléments de la STEP.

Il importe d'y recourir également à chaque fois que l'on construit, agrandit ou transforme une station d'épuration.

Pour les stations qui ne requièrent pas d'interventions, il est recommandé de procéder à une analyse sommaire dans les trois ans à venir.

Rénovations
= mise en œuvre
de mesures
d'économie
d'énergie rentables
= analyses
énergétiques au
bon moment,

Critères de décision

Lorsque des mesures d'économie d'énergie doivent être mises en œuvre, il s'agit de veiller à ce que la capacité d'épuration ne soit en rien entravée. Par ailleurs, on observera les principes suivants:

- optimisation de la consommation énergétique
- respect des dispositions légales
- réduction de la pollution environnementale dans tous les domaines (eaux, air, monde animal et végétal)
- prise en compte des exigences requises en matière d'épuration (actuelles et futures)
- maintien de la sécurité en matière d'approvisionnement (en eau et en électricité) et d'exploitation
- prise en compte des conditions d'exploitation et d'entretien (horaire et temps de travail).

Tableau I-4

Mise en œuvre des mesures d'économie d'énergie: critères de décision

Mesures d'économie d'énergie concrètes

La mise en œuvre des mesures d'économie d'énergie se déroule en plusieurs étapes:

1 ère étape - réduction de la demande énergétique à la source:

- réduction du volume d'eaux usées
- dimensionnement approprié des installations
- recours à des procédés de traitement des eaux usées, des boues, etc. consommant peu d'énergie

2ème étape - mesures d'économie d'énergie, en optant pour:

- des moteurs à haut rendement
- des systèmes de régulation adaptés au besoin effectif
- des appareils consommant peu d'énergie (ampoules économiques, etc.)
- une isolation thermique efficace.

3ème étape - couverture de la demande énergétique restante:

- utilisation du gaz de digestion à haute valeur énergétique, voire de l'énergie solaire et de la force hydraulique
- utilisation des rejets de chaleur (dégagés par les procédés ou contenus dans les eaux usées)
- utilisation de la totalité du gaz de digestion par le biais d'installations de couplage chaleur-force
- utilisation d'installations conventionnelles pour couvrir l'éventuel besoin restant.

Tableau I-5

Mesures d'économie d'énergie concrètes classées par ordre de priorité

1.4 Investissement et financement

Ordre de grandeur des investissements énergétiques

Les spécialistes eux-mêmes ont souvent tendance à sous-estimer le montant maximum qui peut être investi pour la mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie sans porter atteinte à la rentabilité d'une STEP. Prenons l'exemple d'une installation de 100 000 équivalents habitants (EH) hydrauliques dont les coûts énergétiques moyens s'élèvent à 0,56 million de francs par an (illustration I-6): si l'on parvient à réduire la consommation d'énergie de 30%, l'investissement peut se monter à 2,3 millions de francs (illustration I-7); les économies réalisées en réduisant la consommation d'énergie permettent de payer les intérêts de ce montant et de l'amortir pendant la période où ces mesures seront appliquées. Autre exemple: si la consommation d'énergie est abaissée de 60% grâce à l'utilisation d'une

installation CCF et à la mise en œuvre de mesures d'économie, le montant de l'investissement peut même atteindre 4,6 millions de francs. C'est dire que ces mesures doivent être prises sans tarder, afin de stopper au plus vite toute dépense inutile.

Le volume financier pouvant être investi dans des mesures d'économie d'énergie pour l'ensemble des stations d'épuration du pays est estimé à 200 millions de francs. Un nouveau marché est donc en train de voir le jour pour les spécialistes chargés d'élaborer plans et projets, ou encore de réaliser ces derniers. Ce marché est appelé à se développer rapidement, car bon nombre de STEP vont devoir subir des rénovations dans les années à venir.

Investir les montants économisés en réduisant la consommation d'énergie dans des mesures d'économie supplémentaires.

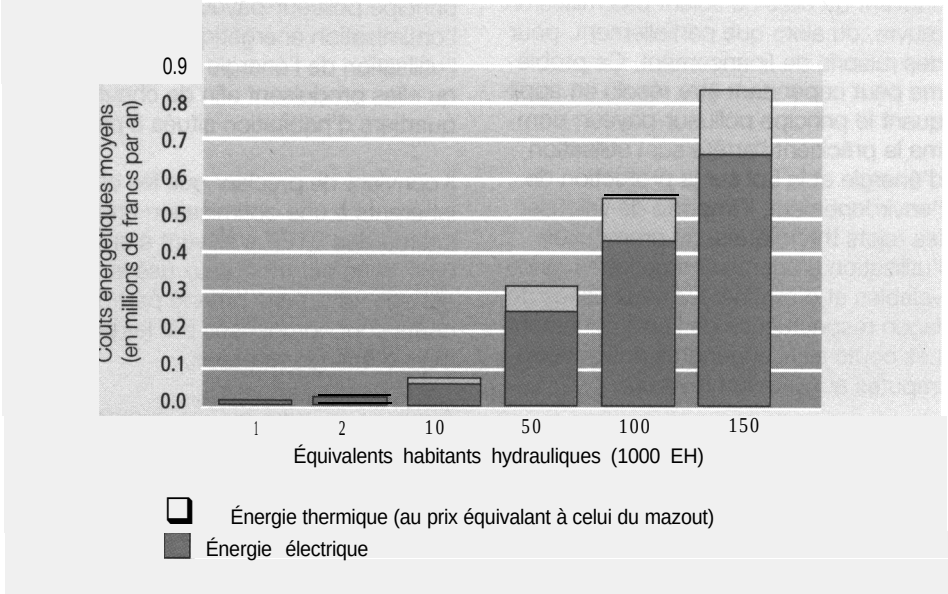


Illustration I - 6
Coûts énergétiques d'une station d'épuration (valeurs moyennes suisses.) (Si une part de la consommation d'énergie électrique et thermique est couverte par la valorisation du gaz de digestion, les coûts baissent d'autant)

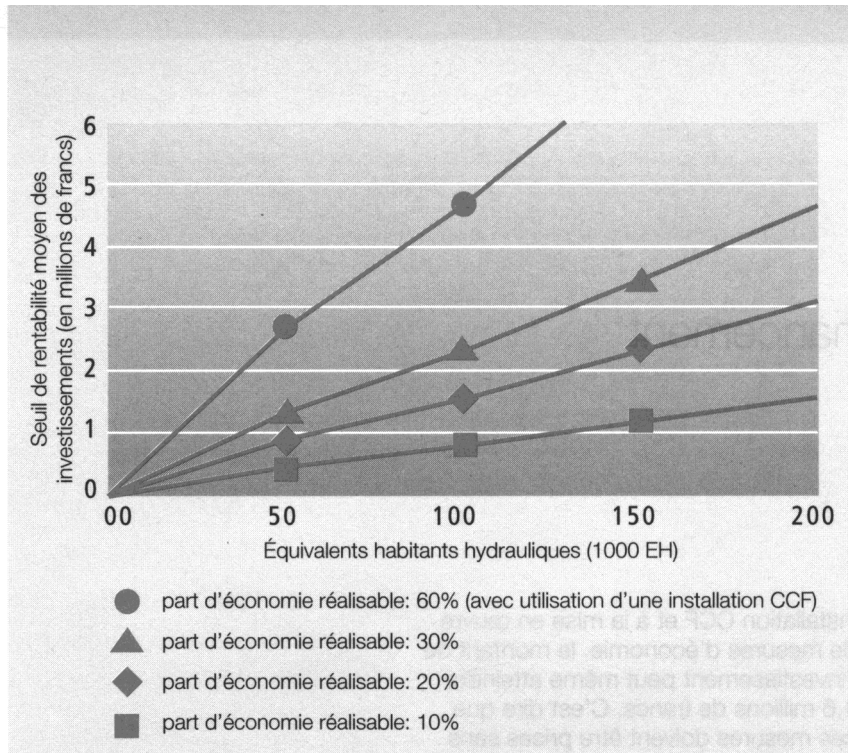


Illustration I-7

Montant des investissements énergétiques permettant d'assurer la rentabilité de l'exploitation (valeurs moyennes suisses)

Financement par les taxes d'épuration: le principe pollueur-payeur

Actuellement, le problème majeur consiste à trouver le financement nécessaire aux investissements que requiert la mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie. Même lorsqu'il est avéré que ces dernières n'affecteront pas la rentabilité de l'exploitation, il arrive encore souvent qu'elles ne soient pas mises en œuvre, ou alors que partiellement, pour des raisons de financement. Ce problème peut cependant être résolu en appliquant le principe pollueur-payeur: comme le précisent l'arrêté sur l'utilisation d'énergie et la Loi sur la protection de l'environnement, il importe de valoriser les rejets thermiques, de promouvoir l'utilisation d'agents énergétiques renouvelables et d'éliminer les eaux usées de façon respectueuse de l'environnement. Les coûts ainsi engendrés doivent être imputés aux consommateurs.

Pour éliminer les eaux usées conformément aux normes environnementales, il convient notamment de limiter au maximum la consommation d'énergie, ce qui implique d'optimiser celle des STEP et de valoriser le gaz de digestion à haute valeur énergétique dans sa totalité. Par ailleurs, l'énergie thermique contenue

dans les eaux usées doit être récupérée à des fins de chauffage de bâtiments. Les investissements en la matière sont considérés comme raisonnables dès lors qu'ils sont rentables.

Dans ce contexte, il s'agit de prendre en considération non seulement la rentabilité de l'exploitation, mais également la politique économique de la commune tout entière (pour les modèles de calcul, voir chapitre 7.4.2 [15]).

Au vu de ce qui précède, le principe pollueur-payeur est ici parfaitement applicable. Pratiquement, cela équivaut à utiliser le produit des taxes d'épuration [10, 16] pour financer les mesures d'optimisation énergétique, étant entendu que les consommateurs d'eau sont à l'origine de leur pollution. Certains cantons étudient actuellement la possibilité d'inscrire ce mode de financement dans leur législation cantonale (voir la Loi cantonale sur l'énergie du canton de Zurich, modification 1993, motion du Conseil d'État). Quant au VSA, il examine, en collaboration avec l'Union des villes suisses, si la Directive concernant le financement de l'assainissement [17, 18] prévoit la possibilité de recourir au principe pollueur-payeur pour financer l'optimisation énergétique des STEP et l'utilisation de l'énergie thermique qu'elles produisent afin de chauffer les quartiers d'habitation situés à proximité.

Il convient de préciser que les coûts inhérents à une optimisation énergétique interne des STEP s'élèvent à environ 0,01 franc par m³ d'eaux usées, ce qui est peu, et qu'une grande part de ces coûts sont compensés par les économies d'énergie réalisées.

A relever en outre qu'une augmentation des taxes d'épuration au nom du principe pollueur-payeur aurait deux effets secondaires non négligeables: elle inciterait les consommateurs à utiliser l'eau de façon plus modérée, ce qui entraînerait, par ricochet, une réduction de l'énergie requise pour son épuration, son traitement et sa distribution.

Financer les investissements énergétiques par les taxes d'épuration (principe pollueur-payeur),

1.5 Économies d'énergie réalisables dans les STEP de Suisse

Possibilités d'économies à long terme

Les économies réalisables par le biais de mesures d'optimisation ont été évalués en 1987 par un groupe d'experts [8] dans l'optique d'une mise en œuvre axée sur le long terme. Les experts avaient alors tenu compte de l'accroissement du volume d'eaux usées et du nombre de phases d'épuration. Il ressort de ces analyses que la consommation totale d'électricité et de combustibles pourrait être quasiment nulle d'ici 2025, en prenant des mesures d'économie d'énergie et en équipant les STEP d'installations CCF permettant une valorisation énergétique du gaz de digestion et des boues d'épuration. Pour obtenir pareil résultat, il faut toutefois procéder à certains changements qui nécessitent l'introduction d'instruments politiques.

Part d'énergie électrique et thermique pouvant être économisée

Une fois mises en œuvre, les mesures doivent faire l'objet de contrôles de fiabilité. Le nombre de ces derniers étant à ce jour très faible, les pourcentages d'économies réalisables sont encore estimatifs (tableau 1-8). Les résultats des analyses détaillées effectuées dans les stations modèles de Weinfelden et de Worblental n'en démontrent pas moins que ces valeurs pourraient même être dépassées dans la pratique.

	Énergie électrique	Énergie thermique
Réduction de la demande énergétique	510%	10-15%
Utilisation d'appareils performants	510%	10-15%
Système de régulation/commande	510%	3- 5%
Potentiel optimal d'économies (total)	1530%	20-30%*

* La majeure partie du besoin en énergie thermique étant couvert par les rejets de chaleur dégagés par l'installation CCF et le surplus de ces rejets ne pouvant guère être utilisé à d'autres fins dans la STEP, on estime à un quart, voire un tiers, les économies effectives réalisables dans le domaine de l'énergie thermique.

Tableau 1-8
Économies d'énergie réalisables (moyenne)

Optimiser les systèmes de commande et de régulation, utiliser des moteurs à haut rendement et adopter des procédés peu gourmands (lits bactériens, disques biologiques immergés, p. ex.) au lieu d'installations à boues activées, très énergivores.



Économies réalisables grâce aux agents énergétiques renouvelables

Aucune statistique sur l'utilisation du gaz de digestion n'ayant été effectuée en Suisse pour l'instant, les données ci-dessous sont le résultat d'une extrapolation [19, 20]. Les STEP qui utilisent environ les quatre cinquièmes du gaz de digestion sont toutes équipées d'installations CCF alimentées, précisément, par ces quatre cinquièmes. On peut donc dire que près des deux tiers du gaz de digestion sont utilisés pour produire de l'énergie mécanique et électrique. Cette proportion pourrait cependant être accrue: on estime en effet que les installations CCF peuvent absorber plus de 95% du volume de gaz de digestion. Par ailleurs, en remplaçant les appareils existants par des modèles plus performants, il est possible d'améliorer d'environ 20% le rendement électrique. Il conviendrait en outre - il reste encore à en analyser les possibilités - que le gaz de digestion soit aussi valorisé dans les STEP n'ayant pas d'installations CCF (de 5 à 10 000 EH).

Les capteurs solaires, en revanche, ne présentent aucun intérêt pour les STEP, car le besoin en énergie thermique est couvert par les rejets thermiques des installations CCF.

Dans les STEP à grande différence de chute, il convient d'envisager l'installation de petites centrales hydrauliques [21].

Dernière possibilité à examiner, enfin: l'énergie thermique contenue dans les eaux usées. Celle-ci peut en effet être utilisée pour alimenter les quartiers d'habitation avoisinant les STEP de 5 à 10 000 EH et les centrales de chauffe situées dans un rayon de 1 à 2 km.

La grande majorité des stations d'épuration présentent toutes les conditions requises pour l'installation de cellules photovoltaïques, mais le prix de revient de ces dernières est, actuellement encore, trop élevé. La pose d'une installation à 3 kW par STEP de 7 000 EH permettrait de couvrir 1% environ du besoin en électricité des stations d'épuration. L'objectif d'Energie 2000 visant à augmenter l'apport des énergies renouvelables - et donc de l'énergie solaire - à la production d'électricité serait ainsi atteint dans les communes.

L'optimisation énergétique des STEP: un moyen de contribuer à la réalisation des objectifs d'Énergie 2000 pour les communes.

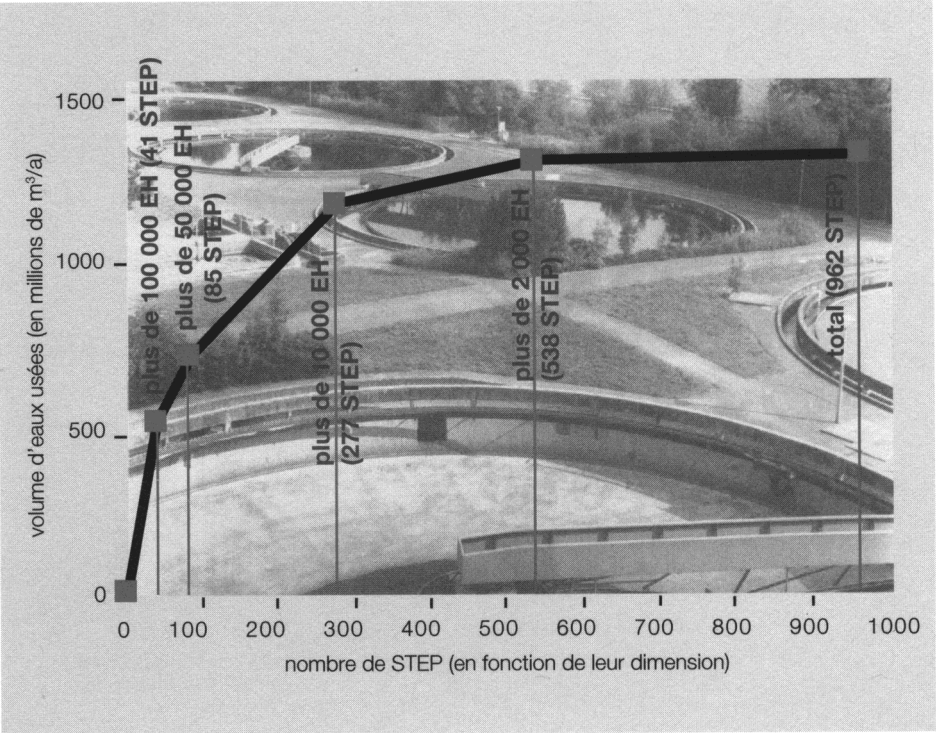


Illustration 1-9
Les stations d'épuration de Suisse (selon les volumes d'eaux usées enregistrés en 1990)

Bilan total

La mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie ajoutée à l'utilisation d'agents énergétiques renouvelables permet de réduire la consommation d'électricité d'environ 0,7 PJ/a et la consommation de combustibles de près de 0,3 PJ/a, pour autant que les possibilités énumérées ci-dessus soient pleinement exploitées.

Selon les estimations (1993), on enregistrera d'ici l'an 2000 une diminution d'un tiers des montants ci-dessus. Les objectifs d'Énergie 2000 seraient ainsi largement atteints pour ce qui est des STEP, puisque, dans les 100 plus grandes d'entre elles, il est possible de réduire de moitié en tout cas ces montants et que, dans les 300 stations de plus de 10 000 EH, la proportion dépasse 90% (illustration I-9).



2. Consommation énergétique des STEP

	pages
2.1 La consommation énergétique des STEP en chiffres	16
2.2 Les composantes	21
2.3 L'épuration des eaux	26
2.3.1 Les déversoirs d'orage et bassins d'eaux de pluie	28
2.3.2 Le relevage et le pompage	29
2.3.3 Le dégrillage	32
2.3.4 Le dessablage et le déshuilage	32
2.3.5 Les bassins de décantation	33
2.3.6 Le traitement biologique	34
2.3.7 La déphosphatation (chimique)	38
2.3.8 La filtration	39
2.4 Le traitement des boues	41
2.4.1 L'élimination des particules grossières	42
2.4.2 Cépaisissement primaire	42
2.4.3 L'hygiénisation	44
2.4.4 La stabilisation	46
2.4.5 La réduction du volume des boues	49
2.4.6 Leséchagedes boues	52
2.4.7 Le compostage des boues	53
2.4.8 L'entreposage provisoire (réservoir)	53
2.5 L'infrastructure	54
2.5.1 L'approvisionnement en eau	54
2.5.2 L'air comprimé	54
2.5.3 Lechauffage	55
2.5.4 La ventilation	55
2.5.5 L'épuration de l'air évacué	55

2.1 La consommation énergétique des STEP en chiffres

Les 962 stations d'épuration du pays (données OFEFP 1990) consomment environ 1 PJ/a (0,3 TWh/a) d'électricité fournie par le réseau public et 0,3 PJ/a de combustibles (= 7 000 t de mazout ou de gaz naturel), ce qui équivaut respectivement à des dépenses annuelles de 40 et 3 millions de francs.

Les stations d'épuration sont des installations d'une grande complexité dans lesquelles la consommation d'énergie varie considérablement selon les procédés utilisés pour le traitement des eaux usées et des boues, le mode d'exploitation, les conditions géographiques et la dimension de la STEP. Cela étant, les mesures d'optimisation énergétique ne peuvent être définies dans les détails que de cas en cas. Il est toutefois possible d'évaluer la consommation d'énergie en se fondant sur les valeurs moyennes suisses calculées sur la base de wl m^3 d'eaux usées, grandeur de référence commune à toutes les STEP. (L'estimation plus précise de la consommation d'énergie repose sur des critères plus différenciés, exposés aux chap. 2.2 et 7.5.)

Énergie mécanique, éclairage et chaleur: telles sont les formes d'énergie requises par les différents procédés de traitement des eaux usées et des boues. La consommation d'énergie finale de chacune d'elles peut être réduite par le biais de mesures d'économie d'énergie d'une part, et en valorisant le gaz de digestion au moyen d'une installation de couplage chaleur-force d'autre part. Il convient toutefois d'abaisser le besoin énergétique en prenant des mesures à la source, c'est-à-dire en réduisant le volume d'eaux usées.

Volume d'eaux usées: possibilités de réduction

Selon les chiffres de l'OFEFP, l'ensemble des STEP du pays ont traité ces dernières années 1,8 milliard de m^3/a d'eaux usées; moins de la moitié de ce volume est constituée d'eaux à proprement parler polluées, les 55% restants étant essentiellement des eaux de pluie ou des eaux claires parasites non polluées [22].

Le volume d'eaux usées d'une STEP peut être réduit de deux manières:

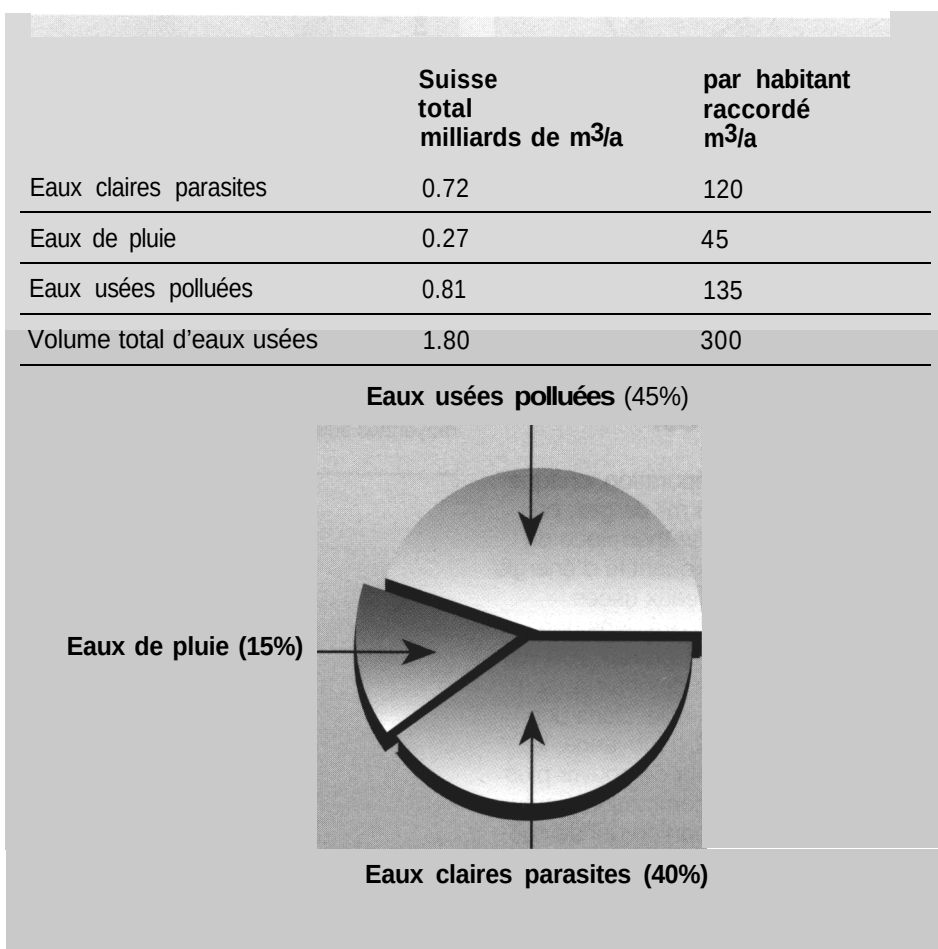
- 1 en incitant les consommateurs à faire de l'eau un usage modéré: redevances proportionnelles au volume consommé et directives non seulement à leur intention, mais également à celle des fabricants pour que les appareils ménagers soient moins gourmands, utilisation d'eaux grises:
- 2 en réduisant le volume d'eaux de pluie et d'eaux claires parasites aboutissant dans les STEP: bassins de décharge, systèmes séparatifs, infiltration, déversement direct dans l'exutoire.

Les possibilités d'économies réalisables par les consommateurs – tant privés que publics – sont encore trop peu connues. Selon les études effectuées dans les bâtiments publics de la ville de Zurich, la consommation d'eau pourrait être abaissée de 20 à 40% [23].

Quant aux mesures énumérées sous chiffre 2, elles n'entrent pas dans le cadre du manuel et n'y sont donc pas développées. Précisons toutefois que la réduction du volume d'eaux de pluie et

Consommation d'électricité des STEP: environ 1% de la consommation totale, 20% de la consommation communale.

d'eaux claires parasites par le biais de systèmes séparatifs implique des investissements considérables et que les techniques d'infiltration font l'objet d'une publication [24].

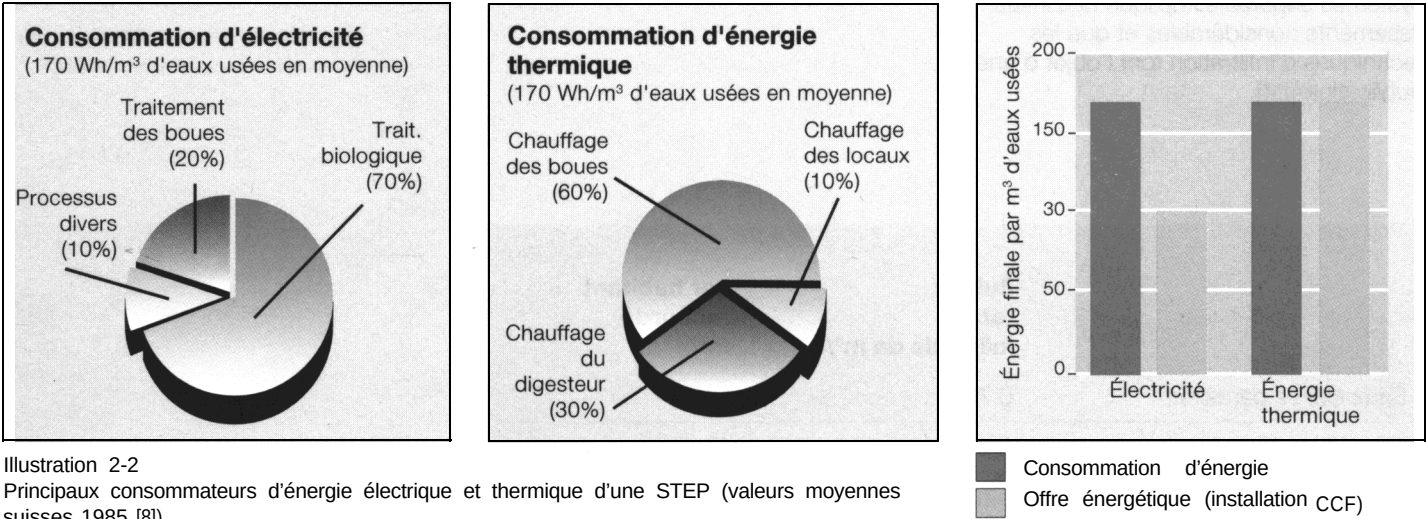


Utiliser l'eau modérément: une consigne que les communes doivent et peuvent faire respecter.

Illustration 2-1
Volume total d'eaux usées aboutissant dans les STEP de Suisse [8, 22]

Principaux consommateurs d'énergie

La consommation énergétique totale des STEP n'ayant pas été déterminée ces dernières années, les données ci-dessous correspondent aux valeurs moyennes enregistrées en 1985 [8].



Couverture du besoin énergétique par les installations CCF

Lors du processus d'épuration, chaque m³ d'eau dégage 0,05 m³ de gaz, ce qui, pour une puissance thermique de 23 MJ/m³, donne une quantité d'énergie finale de 1,1 MJ/m³ d'eaux usées (310 Wh/m³) [8]. Récupéré dans une installation CCF, ce gaz produit 100 Wh d'électricité et 170 Wh de chaleur, soit 270 Wh/m³ d'énergie utile. Dans une installation de dimension moyenne, le gaz de digestion permet de couvrir plus de la moitié de la consommation électrique actuelle, une proportion qui devrait passer à trois quarts une fois les mesures d'optimisation mises en œuvre.

Illustration 2-3
Couverture du besoin d'énergie électrique et thermique par le gaz de digestion (valeurs moyennes suisses 1985 [8])

Les prix et les coûts de l'énergie

Outre sa valeur énergétique élevée, l'électricité a des propriétés physiques plus intéressantes que les combustibles, ce qui se reflète au niveau des prix: par unité d'énergie, l'électricité coûte quatre fois plus cher que le mazout.

	Prix de base	Prix comparatifs
Électricité	14 ct/kWh	38,9 frs/GJ 414%
Énergie thermique	40 ct/kg de mazout (huile de chauffage EL)	9,4 Fr/GJ 100%

Tableau 2-4
Prix moyens de l'électricité et de l'énergie thermique (données OFEFP, 1992)

Les quantités d'énergie consommées sous forme d'électricité et de chaleur sont quasi équivalentes, mais, de par son prix, l'électricité entre pour 80% dans les dépenses énergétiques des STEP, et même plus lorsque ces dernières sont équipées d'installations CCF. C'est dire que les analyses énergétiques doivent être centrées avant tout sur l'électricité.

Valeurs énergétiques moyennes (données OFEFP)

Les données de l'OFEFP ont été calculées en 1988 sur la base de 300 STEP représentant la moitié de la consommation totale d'énergie requise pour épurer les eaux usées du pays. On ne dispose pour l'heure pas de données complètes plus récentes.

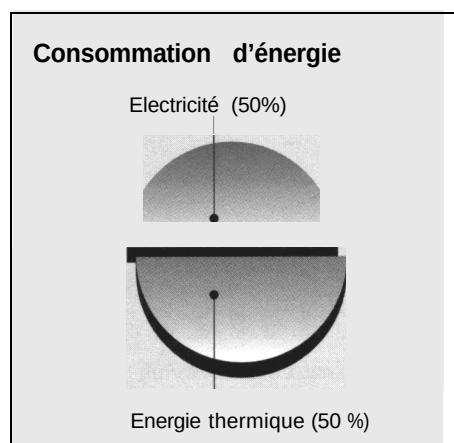
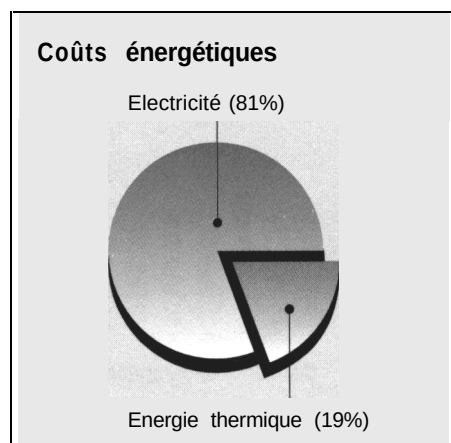


Illustration 2-5
Pondération - énergie électrique - énergie thermique



■ Énergie thermique au prix équivalent à celui du pétrole

Coûts énergétiques d'une STEP:
2,8 ct par m³ d'eau épurée et 9 frs/a par habitant raccordé, soit 1% de la facture énergétique d'un ménage moyen (transports non compris).

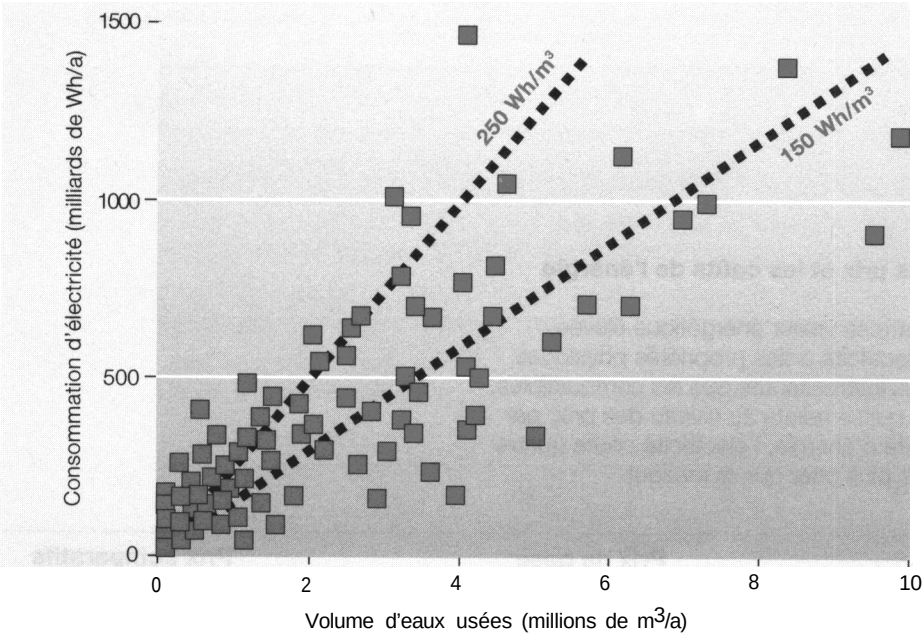
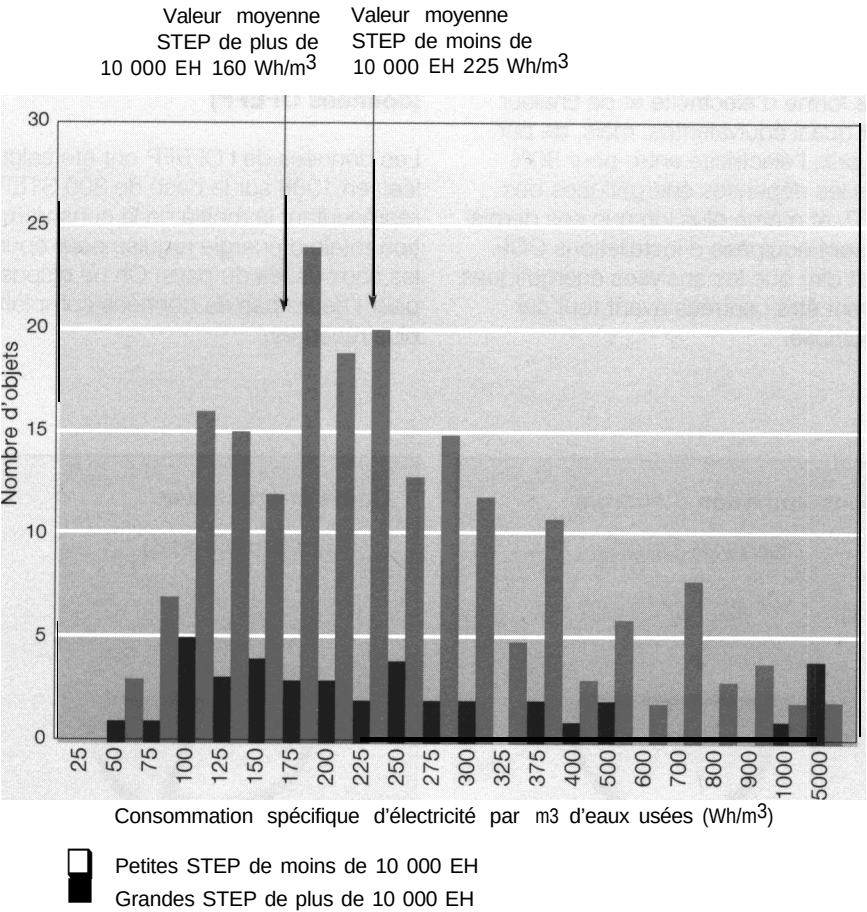


Illustration 2-6
Consommation électrique de 300 STEP en fonction du volume d'eaux usées

La dimension d'une STEP a une influence déterminante sur la consommation électrique (illustration 2-6), au niveau du volume d'eaux usées et, plus encore, au niveau des équivalents habitants hydrauliques ou biologiques (valeurs de dimensionnement).

D'une façon générale, la consommation spécifique d'électricité - qui s'accroît encore lorsque le nombre d'étapes d'épuration augmente - est plus élevée dans les petites STEP que dans les grandes. La dispersion des valeurs est cependant élevée, pour des STEP de même dimension (illustration 2-7).



Consommation d'électricité par m³ d'eaux usées dans les STEP de moins et plus de 10 000 EH: respectivement 225 et 160 Wh.

Illustration 2-7
Consommation spécifique d'électricité: dispersion

2,2 Les composantes des STEP: techniques

Procédés d'épuration

Les procédés d'épuration, plus ou moins sophistiqués selon l'année de construction ou de transformation des STEP, sont au nombre de trois:

- l'épuration mécanique (dégrillage, dessablage, décantation primaire)
- l'épuration biologique (dégradation des substances carbonées, nitrification et dénitrification, décantation secondaire)
- l'épuration complémentaire (déphosphatation, filtration).

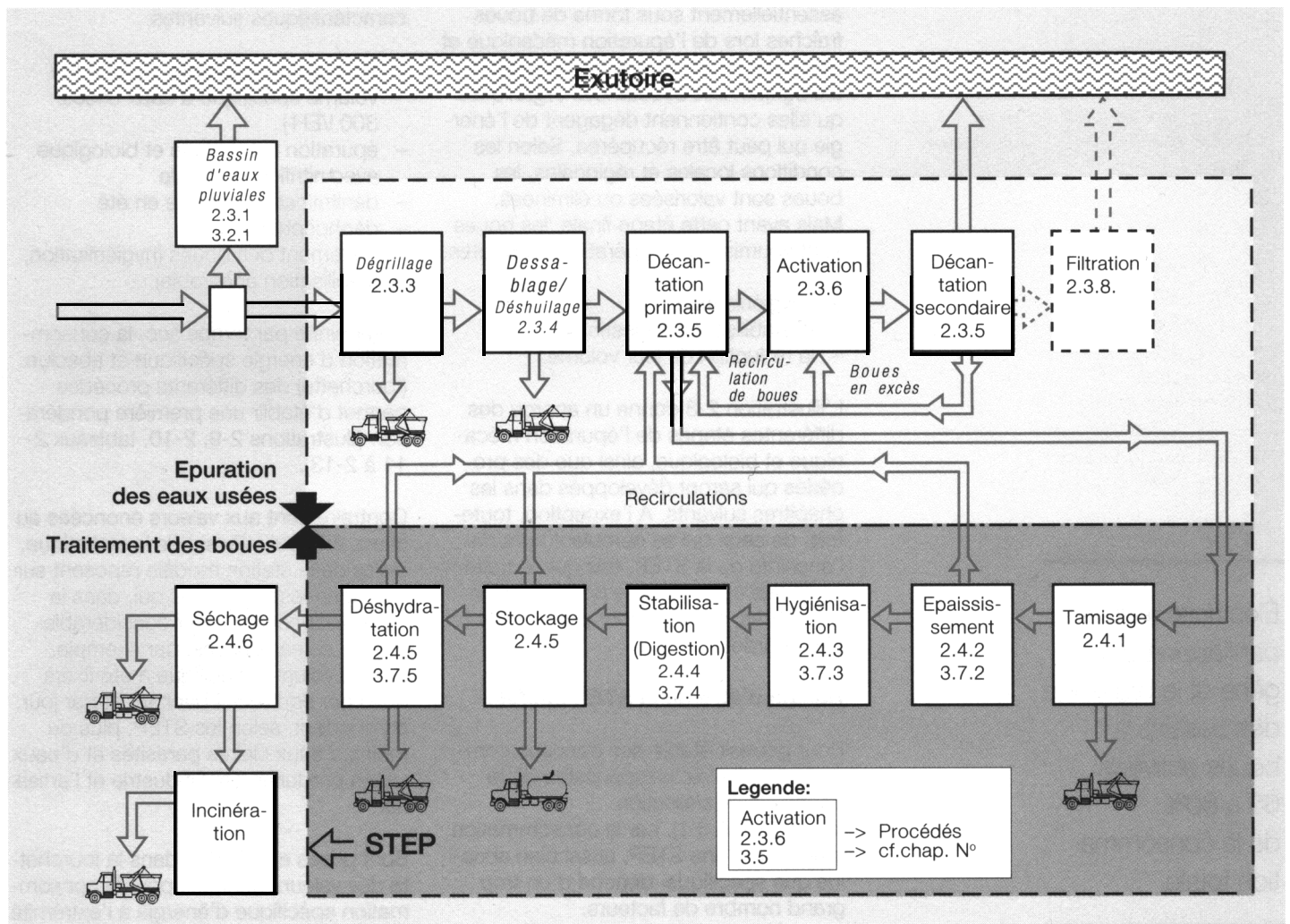


Illustration 2-8
STEP modèle: schéma des différentes opérations

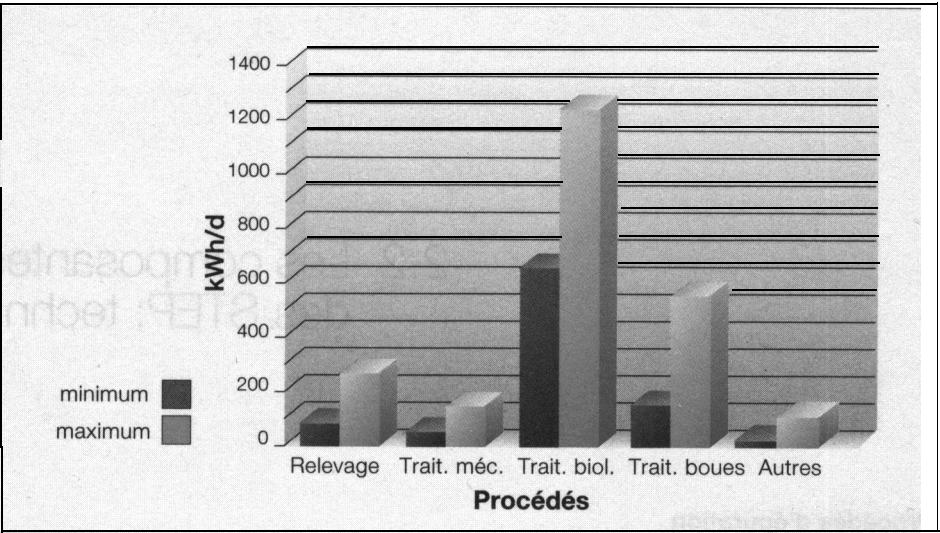


Illustration 2-9
STEP modèle (20 000 EH): répartition de la consommation d'électricité

Les boues issues de l'épuration des eaux sont extraites à plusieurs reprises, essentiellement sous forme de boues fraîches lors de l'épuration mécanique et de boues en excès lors de l'épuration biologique. Les substances organiques qu'elles contiennent dégagent de l'énergie qui peut être récupérée. Selon les conditions locales et régionales, les boues sont valorisées ou éliminées. Mais avant cette étape finale, les boues sont soumises aux opérations suivantes:

- l'hygiénisation
- la stabilisation (digestion)
- la réduction de leur volume.

L'illustration 2-8 donne un aperçu des différentes étapes de l'épuration mécanique et biologique, ainsi que des procédés qui seront développés dans les chapitres suivants. A l'exception, toutefois, de ceux qui se déroulent hors de l'enceinte de la STEP, tels que le traitement des eaux de pluie ou le séchage des boues, qui ne seront que peu, voire pas abordés.

Raison d'être de la STEP modèle

Pour pouvoir établir des données comparatives, il était indispensable de recourir à la modélisation (cf. annexe A 3.1), car la consommation d'énergie d'une STEP, aussi bien absolue que spécifique, dépend d'un trop grand nombre de facteurs.

Représentative des installations typiques du pays, la STEP modèle présente les caractéristiques suivantes:

- équivalents habitants: 20 000 EH
- volume spécifique d'eaux usées: 300 l/EH j
- épuration mécanique et biologique avec nitrification totale
- dénitrification partielle en été
- déphosphatation
- traitement des boues (hygiénisation, stabilisation anaérobie).

Déterminée par temps sec, la consommation d'énergie spécifique et absolue (fourchette) des différents procédés permet d'établir une première pondération (illustrations 2-9, 2-10, tableaux 2-11 à 2-13).

Contrairement aux valeurs énoncées au chap. 2.1, qui relèvent de la statistique, celles de la station modèle reposent sur des données théoriques qui, dans la pratique, peuvent varier considérablement. Les eaux usées, par exemple, dont le volume spécifique a été fixé à 300 l par équivalent habitant et par jour, comportent, selon les STEP, plus ou moins d'eaux claires parasites et d'eaux usées produites par l'industrie et l'artisanat.

Sont prises en compte dans la fourchette des valeurs données pour la consommation spécifique d'énergie à l'extrémité inférieure les stations à épuration mécanique minimale présentant un bilan éner-

Électricité requise par l'apport d'oxygène et le brassage des bassins à boues activées: 60 à 80% de la consommation totale.

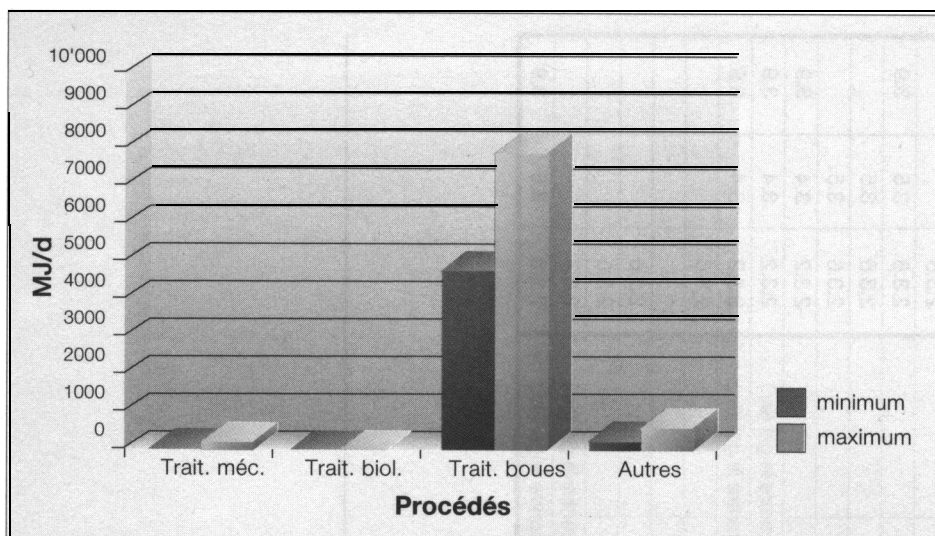


Illustration 2-1 0
STEP modèle (20 000 EH): répartition de la consommation d'énergie thermique

gétique favorable et, à l'extrémité supérieure, les stations à épuration mécanique maximale dont le bilan énergétique est plutôt défavorable.

Le traitement des boues consomme à lui seul environ un cinquième de la consommation d'électricité et quatre cinquièmes de la consommation de chaleur. La marge de dispersion de ces proportions varie passablement selon le nombre de procédés de traitement.

Du point de vue énergétique, les différents moyens et procédés d'épuration peuvent être combinés de façon plus ou moins optimale. Eu égard à la multiplicité des combinaisons possibles, il a été jugé préférable d'analyser chaque procédé isolément. En conséquence, les valeurs ne peuvent être additionnées que sous certaines conditions.

La base de référence la plus fréquemment utilisée pour les valeurs spécifiques est le volume (1 m^3), qu'il s'agisse du traitement des eaux usées ou des boues d'épuration. Pour ces dernières, toutefois, on a opté pour la quantité de matière sèche (1 t MS) lorsque la consommation énergétique d'un procédé dépend avant tout de la teneur en matière sèche.

Selon les fabricants, les installations présentent des différences trop importantes pour pouvoir décrire en détail le déroulement des procédés. Il n'en sera

donc fait ici qu'une présentation d'ordre général, liée à leur consommation énergétique:

chapitre 2.3

Procédés d'épuration des eaux usées

chapitre 2.4

Procédés de traitement des boues

chapitre 3:

Procédés requérant une grande quantité d'énergie et économies possibles.

ÉPURATION DES EAUX		ÉLECTRICITÉ			ÉNERGIE THERMIQUE		cf. chapitre du manuel			
PROCÉDÉ	COMPLÉMENT	Consommation de la STEP modèle (20 000 EH)			Consommation de la STEP					
		spécifique quotidienne		kWh/d *4a	spécifique	quotidienne				
		Wh/m³ d'eaux usées *4			MJ/m³	MJ/d				
A l'extérieur de la STEP										
Bassins d'eau de pluie	Bas. rétention/décantation	4	*1		*X			2.3.1	3.2	3.9
Dans la STEP										
Relevage des eaux usées	diverses possibilités	3 - 11	*2	*3	70 - 260			2.3.2	3.4	3.9
Dégrillage		0.5 - 1.5			3 - 9	protection contre le gel (év.)		2.3.3		
Dessablage	longitudinal	6 - 13			35 - 80			2.3.4		3.9
	circulaire	non aéré	4 - 5		25 - 30			2.3.4		
Déshuilage	intégré au dessablage	inclus			inclus.			2.3.4		
Décantation primaire		2			12			2.3.5		
Traitement des boues activées	Dégradation de C	100 - 135			600 - 820			2.3.6	3.5	3.9
	Nitrification	62 - 85			370 - 510			2.3.6	3.5	
	Dénitrification (en été)	-19 à -25			-110 à -150			2.3.6	3.5	
Recirculation des eaux usées	(Dénitrification)	2.2 - 3			14 - 20			2.3.2	3.4	3.9
Recirculation des boues					40 - 80	protection contre le gel (év.)		2.3.2	3.4	3.9
Extraction des boues en excès.					1.2 - 2	protection contre le gel (év.)		2.3.2	3.4	3.9
Variante lit bactérien	sans relevage	30 - 40			180 - 250			2.3.6		
	avec relevage	45 - 55			270 - 330					
Variante disques biol. immergés		16 - 40			90 - 230			2.3.6		
Décantation secondaire		2			12			2.3.5		
Elimination du phosphore	Pré-précip./précip. simult.	0.5			2 - 3	protection contre le gel (év.)		2.3.7		
Filtration / Relevage des eaux		pas de données				protection contre le gel (év.)		2.3.8	3.6	3.9

*1 Consommation d'énergie pour 1 m³ d'eau et pour 1 m de hauteur de relevage
*2 Consommation d'énergie pour 1 m³ d'eaux usées et pour 1 m de hauteur de relevage
*3 Hauteur de relevage: 4 m
*4 + *4a *4 base: 300 l/EH d *4a base: 6 000 m³/d
*X Pas de relation pertinente avec la STEP modèle

Tableau 2-11
STEP modèle: consommation d'énergie requise pour épurer 1 m³ d'eaux usées (base de référence)

TRAITEMENT DES BOUES		ÉLECTRICITÉ			ÉNERGIE THERMIQUE		cf. chapitre du manuel		
PROCÉDÉ	COMPLÉMENT	Consommation de la STEP modèle 20'000 EH			Consommation de la STEP				
		spécifique		quotidienne	spécifique	quotidienne			
		kWh/m³ de boues	kWh/t MS (boues)	kWh/d	MJ/m³ de boues	MJ/d			
Elimination des part. grossières	Criblage	0.05 - 0.09		2.5 - 5	protection contre le gel (év.)		2.4.1		
Epaississement primaire	Epaississement statique	0		0			2.4.2	3.7.2	3.9
Boues fraîches (44 m³/j)	Filtre en tissu	0.3 - 0.5		13 - 22	chauffage réduit			2.4.2	3.9
Boues fraîches (44 m³/j)	Presse		15 - 25	33 - 55	chauffage réduit		2.4.2		3.9
Boues en excès (180 m³/j)	Filtre en tissu	0.3 - 0.5		50 - 90	chauffage réduit				3.
Boues en excès (180 m³/j)	Flottation		120 - 200	110 - 180			2.4.2		3.9
Boues en excès (180 m³/j)	Décantation		100 - 200	90 - 180	chauffage réduit		2.4.2		3.9
Hygiénisation (44 m³/j)	Pasteurisation	1.4 - 2.1		60 - 90	6 - 12	280 - 550	2.4.3	3.7.3	3.9
	aérobie thermophile	3.4 - 5		150 - 220	13 - 23	660 - 1000	2.4.3	3.7.3	3.9
	Traitement à la chaux	5 - 7		30 - 45	chauffage réduit		2.4.3		
Stabilisation (44 m³/j)	aérobie psychrophile (fr.)	5 - 7		220 - 310			2.4.4		
	aerobie thermophile	7 - 15		300 - 660	50 - 80	2200 - 3500	2.4.4		5.2
	anaérobie psychrophile	0.9 - 1.1		40 - 50			2.4.4		
	anaérobie mésophile	1.6 - 2.3		70 - 100	100 - 160	4500 - 7000	2.4.4	3.7.4	3.9+5.2
Déshydratation (27 m³/j) (1,62 t MS/j)	Epaississement sec. stat.	0 - 1.5		0 - 40			2.4.5	3.7.5	
	Décantation		35 - 55	55 - 90	chauffage réduit		2.4.5	3.7.5	3.9
	Centrifugeuse		50 - 60	80 - 100	chauffage réduit		2.4.5	3.7.5	3.9
	Filtre à bandes		15 - 30	25 - 50	chauffage réduit		2.4.5	3.7.5	3.9
	Filtre-presse		40 - 55	65 - 90	chauffage réduit		2.4.5	3.7.5	3.9
	Déshydratation en 2 étapes	Filtre à membranes		55 - 85	90 - 140	chauffage réduit		2.4.5	3.7.5
Séchage	thermique	30 - 40	(base 25% MS)		2200		2.4.6		
Compostage		4 - 12		25 - 75			2.4.7		
Stockage	Boues humides	0 - 1.5		0 - 40			2.4.8		
Extraction des boues	Boues fraîches	0.023	(pour 4 m CE)	1.3	chauffage réduit		2.3.2	3.4	
	Boues digérées	en fonction des procédés			chauffage réduit			3.4	

Tableau 2-12
STEP modèle: consommation d'énergie requise pour le traitement 1 m³ de boues ou 1 t MS

INFRASTRUCTURE		ÉLECTRICITÉ			ÉNERGIE THERMIQUE		cf. chapitre du manuel		
ÉLÉMENTS DE LA STEP	COMPLÉMENT	Consommation de la STEP modèle (20 000 EH)			Consommation de la STEP				
		spécifique		quotidienne		quotidienne			
		kWh/ *		kWh/d		MJ/d			
Locaux d'exploitation	Eclairage, labo, atelier			7 - 10	chauffés	200 - 300 *7			5.3
Galerie d'alimentation en énergie	Eclairage			< 1					
Moyens d'exploitation									
eau potable	Du réseau	externe		externe			2.5.1	3.8.1	
eau de cons. industrielle	Réseau interne	0.25 - 0.50 *4		2 - 30			2.5.1	3.8.1	3.9
air comprimé	Réseau interne	0.1 *5		1 - 5			2.5.2	3.8.2	3.9
chauffage				10 - 30 *7			2.5.3		
ventilation				5 - 8 *6			2.5.4	3.8.3	3.9
Épuration de l'air vicié							2.5.5	3.8.3	

*4 par m³ d'eau industrielle * base de référence variable, cf. *4 et *5
*5 par m³ d'air comprimé (aspiré)
*6 débit d'air: 1 000 m³/h
*7 moyenne journalière durant la période de chauffage

Tableau 2-13
STEP modèle: consommation d'énergie requise pour l'infrastructure (base de référence variable)



2. CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES STEP

2.3 L'épuration des eaux

2.3.1

Les déversoirs d'orage et bassins d'eaux de pluie

Les déversoirs d'orage installés dans les réseaux de canalisations permettent de limiter le volume d'eaux de pluie aboutissant dans les STEP. L'eau ainsi recueillie est amenée directement dans l'exutoire ou passe d'abord dans un bassin de décharge, où les substances polluantes décantables ainsi qu'une partie des matières flottantes sont retenues, avant d'être dirigée dans l'exutoire. Une fois les précipitations calmées, une pompe prélève le contenu du bassin qui est acheminé vers la STEP par la canalisation d'eaux usées. Mise à part la pompe, les déversoirs d'orage ne consomment pas d'énergie, à moins qu'ils ne soient équipés - ce qui est de

plus en plus fréquent - de systèmes à vannes ou clapets dont la régulation nécessite une faible quantité d'électricité.

L'électricité requise pour actionner la pompe de vidange des bassins de décharge est proportionnelle au volume d'eau et à la hauteur de refoulement (dénivellation + pertes hydrauliques) (cf. chap. 2.3.2).

Consommation d'électricité requise pour les bassins de décharge

(sans rapport avec la STEP modèle)

par m³ d'eaux vidangées
et par m de hauteur de relevage

4 Wh/m³ m

Le nettoyage du bassin requiert également de l'énergie, en quantité très variable selon que l'on utilise une auge déversante ou un jet d'air.

Consommation d'électricité:

par nettoyage pour un bassin de taille moyenne
avec auge déversante: eaux usées ou eau du réseau
avec jet d'air: eaux usées

40 - 400 Wh/opération
500 - 2 000 Wh/opération

2.3.2 Le relevage et le pompage

Si, pour des raisons topographiques, la déclivité de la STEP est trop faible, on est obligé de recourir à des systèmes de relevage et de pompage.

Les premiers permettent aux eaux usées de franchir la dénivellation et les seconds de transporter les eaux sur de grandes distances.

Selon la qualité des eaux, on procédera à l'une et/ou l'autre des opérations suivantes:

- relevage des eaux usées
- pompage des boues fraîches
- recirculation des boues/extraction des boues en excès
- recirculation des eaux usées (dénitrification en tête de bassin)
- pompage durant le traitement des boues.

Qu'il s'agisse du relevage ou du pompage, le besoin énergétique dépend directement du volume et de la hauteur de refoulement (dénivellation + pertes hydrauliques).

Consommation d'électricité (énergie utile):

par m³ d'eaux à relever et par m de hauteur de relevage 2,7 Wh/m³ m

Les pertes étant inévitables aussi bien dans les pompes que dans les systèmes d'entraînement, la consommation d'énergie finale est plus élevée et varie beaucoup:

Consommation d'électricité (énergie finale)

par m³ d'eaux relevées et par m de hauteur de relevage

Rendement des pompes de 0,30 à 0,85

Rendement des moteurs de 0,85 à 0,95

3-11 Wh/m³m

Ces chiffres sont valables, à titre comparatif, pour toutes les stations de pompage. Selon le type de pompe et de moteur, les STEP dont le bilan énergétique est mauvais consomment, pour une même opération de relevage, plus de trois fois plus d'électricité que les STEP dont ledit bilan est bon.

Relevage des eaux usées

Lorsque la différence de niveau d'eau entre l'entrée de la STEP et l'exutoire est inférieure aux pertes hydrauliques de la STEP, les eaux usées doivent être relevées.

La consommation d'électricité d'une station de relevage a été calculée dans la STEP modèle pour une hauteur de relevage supposée de 4 m:

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique 18 Wh/m³ d'eaux usées

absolue 110 kWh/d

Hypothèses:

- débit par temps sec Q_{TS} : 6 000 m³/d

- rendement du système de relevage: 0,60

Pompage des boues fraîches

Effectuée préalablement au traitement des boues, cette opération doit, dans l'optique d'une optimisation énergétique, faire l'objet d'une analyse conjointe

avec l'extraction des boues fraîches intervenant dans le bassin de décantation primaire et avec l'épaississement primaire.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	23 Wh/m ³ de boues fraîches
absolue	1,3 kWh/d

Hypothèses:

- hauteur de relevage: 4 m
- rendement des pompes: 0,35
(la consommation d'électricité requise pour l'extraction des grosses particules (cf. chap. 2.4.1) n'est pas prise en compte)

Recirculation des boues/Extraction des boues en excès

La première de ces opérations consiste à pomper les boues déposées dans le bassin de décantation secondaire pour les transférer dans le bassin d'activation (maintien de la biomasse nécessaire);

quant à la seconde, elle permet, par pompage également, d'entraîner les boues en excès dans le bassin de décantation primaire ou dans l'installation de traitement,

Consommation d'électricité (STEP modèle):

Boues en retour

spécifique	7 Wh/m ³ de boues
absolue	41 kWh/d

Extraction des boues en excès

spécifique	7 Wh/m ³ de boues
absolue	1,2 kWh/d

Hypothèses:

- hauteur de relevage: 1,5 m
- taux de recirculation: 1,0 rapporté à Q_{TS}
- teneur en eau des boues en excès: 99,5%
- rendement des pompes: 0,60

Recirculation des eaux usées

Dans les installations d'activation avec dénitrification en tête, il peut être nécessaire d'amener les eaux usées sortant du bassin de boues activées dans le bassin de dénitrification placé en tête. Le taux de recirculation des eaux usées requis pour la dénitrification ne peut pas être obtenu avec les boues en retour sans surcharge hydraulique du bassin de décantation secondaire.

Pour réduire cette charge (c'est-à-dire pour diminuer les pertes hydrauliques) ainsi que la longueur du trajet, il est recommandé d'installer les pompes à la sortie du bassin de boues activées.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	2,2 Wh/m ³ d'eaux usées
absolue	14 kWh/d

- Hypothèses:
- hauteur de relevage: 0,5 m
 - taux de recirculation: 2 rapporté à Q_{TS} pendant 14 h/d
 - rendement de la pompe: 0,70

2.3.3 Le dégrillage

Les dégrilleurs permettent d'éliminer les particules grossières contenues dans les eaux usées. La puissance requise est faible et indépendante du volume d'eau. Elle se répartit comme suit:

dégrilleur avec déblayage automatique	0,7 - 3,0 kW
dégrilleur avec transport des déchets de dégrillage (à vis ou à bande)	0,6 - 3,0 kW
dégrilleur avec déshydratation des déchets de dégrillage	1,0 - 4,0 kW
dégrilleur avec lavage des déchets de dégrillage	5,0 - 10,0 kW

* La valeur maximale de 3,0 kW représente la puissance requise par deux dégrilleurs.

Pour éviter que le dégrilleur ne tourne à vide, son fonctionnement est réglé par la différence de niveau d'eau entre l'entrée et la sortie de l'installation.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	0,5 - 1,5 Wh/m ³ d'eaux usées
absolue	3,0 - 9,0 kWh/d

2.3.4 Le dessablage et le déshuilage

Le dessableur permet de retenir les particules de 0,1 à 0,2 mm de diamètre. Il existe des dessableurs longitudinaux aérés et des dessableurs circulaires ou

longitudinaux non aérés. Les premiers, munis d'un séparateur d'huile intégré, sont recommandés pour les STEP à partir de 10 000 EH.

Section transversale du dessableur m ²	Apport d'air spécifique (par unité de volume) Nm ³ /m ³ h	Consommation spécifique d'électricité (par unité de volume) Wh/m ³ h
1.0 - 3.0	0.5 - 0.9	a - 15
3.0 - 5.0	0.5 - 1.1	a - 18
> 5.0	0.5 - 1.3	a - 20

Tableau 2-14
Consommation spécifique d'électricité requise par un dessableur longitudinal aéré [41]

Selon le type de dessableur, l'électricité consommée est requise pour:

- le maintien de la turbulence (hélice, air)
- l'élimination du sable (sédiments)
- l'élimination des huiles (matières flottantes).

L'apport d'air et, partant, la dépense énergétique (dessableur longitudinal aéré) sont fonction de la section transversale traversée (tableau 2-I 4).

Pour éviter une dépense d'énergie inutile, l'apport d'air dans les dessableurs aérés doit être réglé et dosé avec précision, non pas par le biais de clapets ou de vannes, mais au moyen d'un dispositif monté sur les soufflantes (nombre de tours).

2.3.5
Les bassins de décantation

Les bassins de décantation sont utilisés pour éliminer les particules solides contenues dans les eaux usées (bassin de décantation primaire), ainsi que pour extraire les boues contenues dans les eaux usées épurées (bassin de décantation secondaire). Ronds ou rectangulaires, ils sont alimentés respectivement par le centre ou par les bords. Les pertes hydrauliques des bassins à siphon central sont de trois à cinq fois supérieures à celles des bassins rectangulaires (resp. 0,5 m et 0,1 à 0,2 m de colonne d'eau). De plus, en cas de dénivellation insuffisante, l'alimentation par siphon occasionne une dépense d'énergie supplémentaire (pompage).

Les dispositifs de raclage requièrent les puissances suivantes:

Consommation d'électricité (STEP modèle):

Dessableur longitudinal aéré

spécifique	6 - 13 Wh/m ³ d'eaux usées
absolue	35 - 60 kWh/d

Dessableur circulaire non aéré

spécifique	4 - 5 Wh/m ³ d'eaux usées
absolue	25 - 30 kWh/d

- ponts racleurs 0,25 - 0,75 kW
- racleurs à chaînes 0,12 - 0,55 kW
- racleurs suceurs 1,1 - 4,0 kW*

* La valeur maximale représente la puissance requise par deux pompes.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	2 Wh/m ³ d'eaux usées
absolue	12 kWh/d

Hypothèse: 1 pont racleur

2.3.6

Le traitement biologique

Au cours du traitement biologique, les substances carbonées sont dégradées et les substances azotées transformées par des microorganismes.

Dégradation des substances carbonées

Les substances organiques dissoutes sont dégradées en dioxyde de carbone (CO_2) et utilisées pour la constitution de la substance cellulaire des microorganismes. La dégradation des substances carbonées requiert un apport d'oxygène (O_2)

Nitrification

Les micro-organismes nitrosomonas et nitrobacter oxydent l'azote total (N-NH_4) contenu dans les eaux usées et le transforment en nitrate (NO_3). Cette opération nécessite également un apport d'oxygène.

Dénitrification

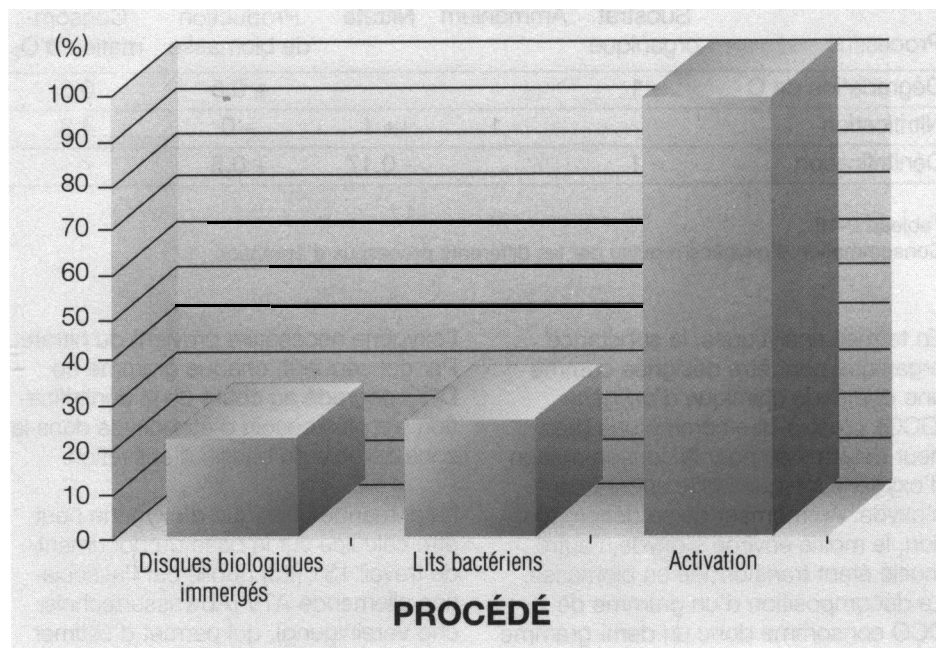
En cas de déficit d'oxygène dissous, l'échange de substances se produit par l'intermédiaire de l'oxygène fixé dans le nitrate et celui-ci est réduit en azote élémentaire qui se dégage dans l'atmosphère. Ce procédé présuppose:

- l'absence d'oxygène dissous (zone anoxique);
- la présence de substances organiques facilement dégradables.

Les combinaisons possibles pour la nitrification et la nitrification/dénitrification sont décrites à l'annexe A 3.2 [45].

L'épuration biologique est effectuée au moyen des systèmes suivants, qui peuvent être combinés:

- installations à boues activées (en une et deux phases)
- lits bactériens
- disques biologiques immergés



Graphique 2-I 5
Consommation d'électricité requise par les différents procédés d'épuration biologique

Les lits bactériens et les disques biologiques immergés présentent des avantages énergétiques non négligeables. Ils sont toutefois peu utilisés en Suisse, essentiellement pour des raisons financières (investissement) et techniques.

Installations à **boues activées**

La quantité d'oxygène requise pour activer les boues dépend directement des processus de dégradation. On peut déterminer combien d'O₂ est consommé par chaque processus pour la dégradation ou la transformation de 1 gramme de substance en établissant un bilan de DCO (demande chimique d'oxygène) ou des transformations de l'azote (tableau 2-I 6).

Effectuer des analyses très précises afin de trouver le procédé optimal pour le plus gros consommateur d'électricité: le traitement biologique.

Processus	Substrat organique	Ammonium	Nitrate	Production de biomasse	Consommation d'O ₂
Dégradation de C	-1			+ 0.5	0.5
Nitrification		-1	+1	- 0	4.3
Dénitrification	-1		- 0.17	+ 0.5	

Tableau 2-I 6
Consommation d'oxygène requise par les différents processus d'épuration

En termes analytiques, la substance organique peut être désignée comme une demande chimique d'oxygène (DCO), c'est-à-dire comme une grandeur déterminée pour la consommation d'oxygène lorsque ladite substance s'oxyde. Au moment de sa décomposition, la moitié environ s'oxyde, l'autre moitié étant transformée en biomasse. La décomposition d'un gramme de DCO consomme donc un demi-gramme d'oxygène.

Le processus de transformation de l'ammonium (NH₄) en nitrate (NO₃) permet d'évaluer la consommation d'oxygène au cours de la nitrification: elle est d'environ 4,3 g O₂ par g N-NH₄ oxydé. Le rapport DCO/N-NH₄ se situant, dans les eaux usées, entre 10 et 15 (échantillon décanté, pas d'industrie importante dans le bassin versant, pas de recirculation des eaux putrides), la quantité d'oxygène requise pour la nitrification peut élever la consommation totale d'O₂ d'un facteur de 2.

Si l'on procède à une dénitrification dans l'installation à boues activées, le nitrate est transformé en azote élémentaire (N₂) et la substance organique est décomposée. La zone où se produisent ces réactions devant être anoxique,

l'oxygène nécessaire provient du nitrate. Par conséquent, chaque gramme de DCO dégradé au cours de la dénitrification n'a plus besoin d'être oxydé dans la zone aérobie du bassin d'activation.

La demande chimique d'oxygène peut être calculée sur la base du document de travail 131 [25] publié par l'association allemande ATV (Abwassertechnische Vereinigung), qui permet d'estimer le dimensionnement des installations d'aération (cf. annexe A 3.3.). On peut également procéder par simulation dynamique afin d'obtenir des indications précises sur la demande d'O₂ pour des charges déterminées.

L'oxygène est fourni par de l'air insufflé au moyen d'aérateurs superficiels ou par de l'air comprimé. Les installations d'aération provoquent également des turbulences qui préviennent la décantation de la biomasse. S'il est prévu de procéder à une dénitrification, la zone y relative doit être équipée d'un dispositif de brassage uniquement.

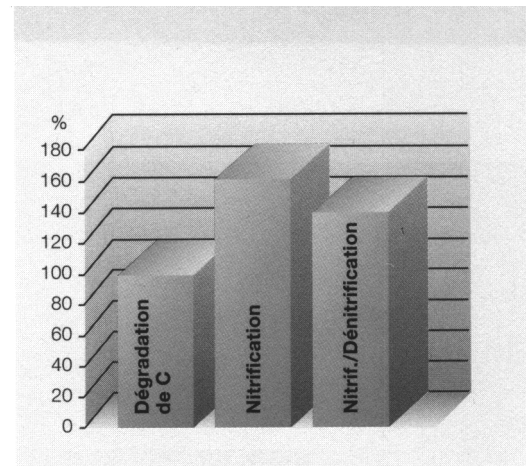


Illustration 2-17
Consommation d'électricité recuise par les différents processus d'épuration

Consommation d'électricité requise par une installation à boues activées

(STEP modèle): pour le détail des calculs, voir l'annexe A 3.1

	Été	Hiver
Dégradation des subst. carbonées	590 kWh/d	614 kWh/d
Nitrification	381 kWh/d	373 kWh/d
„Gain“ par la dénitrification	- 114kWh/d	0 kWh/d
Consommation totale d'électricité	857 kWh/d	987 kWh/d
Consommation spécifique d'électricité par m ³ d'eaux usées	143 Wh/m ³	164 Wh/m ³

- Hypothèses:
- Nitrification totale en hiver
 - Dénitrification partielle en été
 - Aérateurs à plaques
 - Apport spécifique en oxygène des aérateurs à plaques: 2,0 kg O₂/kWh

Lits bactériens

Les lits bactériens peuvent constituer une phase à part entière de l'étape biologique ou des phases de nitrification complémentaires intervenant après l'activation des boues. Au cours de ce procédé, la biomasse, qui a adhéré à un support fixe, est entraînée vers le bas par les eaux usées. La pente hydraulique doit donc être assez importante, supérieure, en tout cas, à la hauteur de remplissage du lit bactérien. Si les con-

ditions topographiques sont réunies pour atteindre la hauteur nécessaire, ce système présente alors, d'un point de vue énergétique, de gros avantages par rapport à une installation d'activation. La biomasse ne devant jamais être asséchée, le lit bactérien doit être alimenté en eau 24 heures sur 24 sur toute sa surface. Pour ce faire, l'eau qui sort du système doit y être réintroduite par pompage.

Lors de l'établissement d'un projet de rénovation ou de transformation, il importe de déterminer avec précision la consommation d'énergie requise par les deux systèmes (bassins à boues activées et lits bactériens), avant de se prononcer pour l'un plutôt que pour l'autre.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	pour la dégradation de C	30 Wh/m ³ d'eaux usées
	pour la nitrification	40 Wh/m ³ d'eaux usées
absolue	pour la dégradation de C	180 kWh/d
	pour la nitrification	250 kWh/d

- Hypothèses
- pas de pompage à l'entrée
 - hauteur de pompage pour la recirculation H = 5 m (dégradation des substances carbonées) H = 7 m (nitrification)
 - recirculation = 1,5 Q_{TS} = 9 000 m³/d



Disques biologiques immergés

Ce système, utilisé dans les petites installations, ne requiert que de l'énergie cinétique. Les disques rotatifs sur lesquels se fixe la biomasse sont alternati-

vement immergés dans les eaux usées, puis ressortis à l'air libre pour y emmagasiner de l'oxygène.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	pour la dégradation de C pour la nitrification	16 - 31 Wh/m³ d'eaux usées 23 - 40 Wh/m³ d'eaux usées
absolue	pour la dégradation de C pour la nitrification	90 - 190 kWh/d 140 - 230 kWh/d

2.3.7

La déphosphatation (chimique)

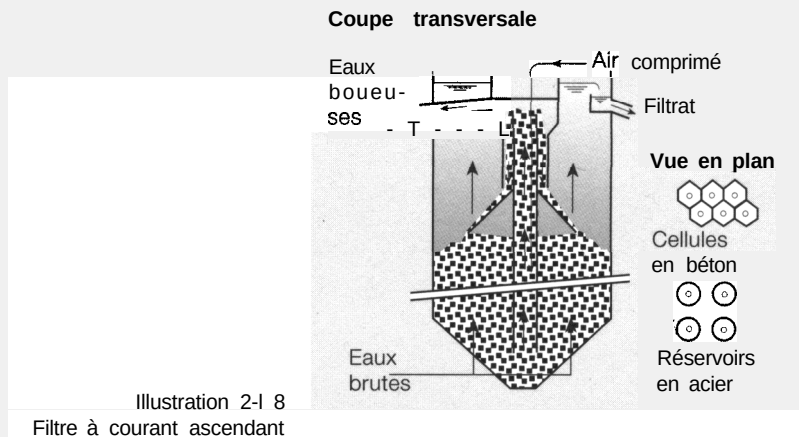
Pour provoquer la déphosphatation, on ajoute dans les eaux usées des produits chimiques qui précipitent le phosphore: celui-ci est ensuite prélevé avec les boues en excès qui le contiennent.

Si la consommation d'énergie directe requise par cette opération est faible, il n'en va pas de même de la consomma-

tion indirecte: en effet, le transport des produits chimiques - utilisés en grande quantité - nécessite de l'énergie. De plus, la précipitation du phosphore provoque une augmentation du volume des boues et une diminution du pouvoir de décantation, ce qui accroît la consommation d'énergie électrique et thermique.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	0,5 Wh/m ³ d'eaux usées
absolue	2 - 3 kWh/d



2.3.8 La filtration

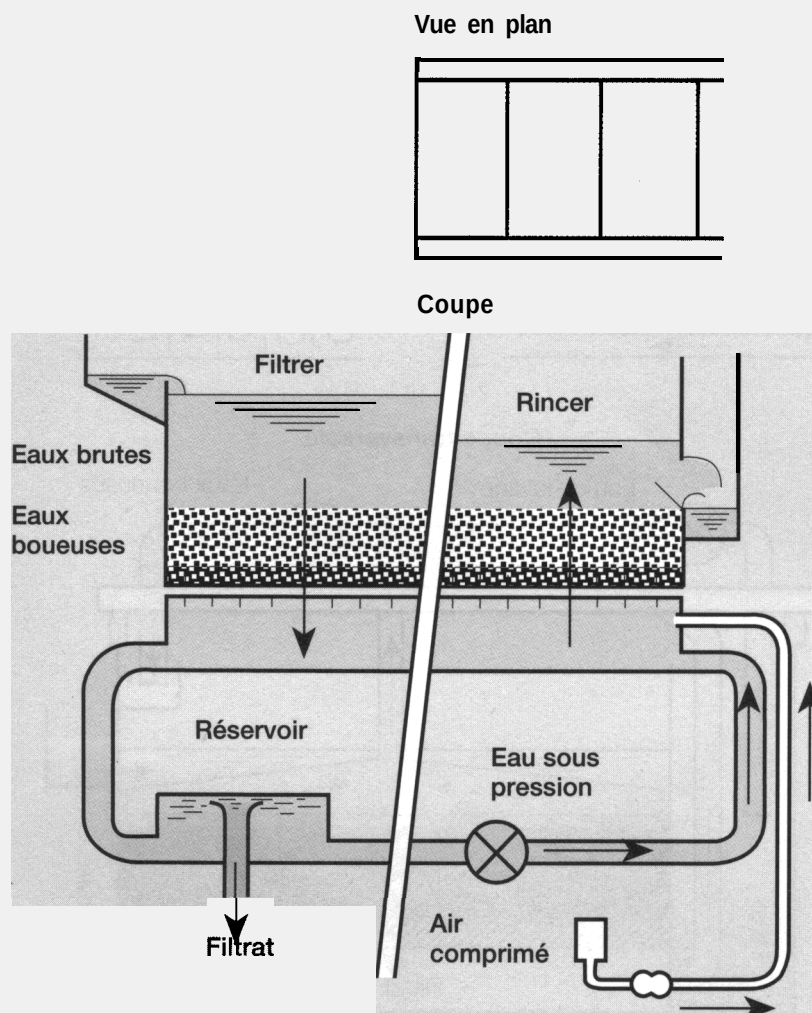
La filtration est une étape d'épuration complémentaire intervenant après l'épuration biologique. Elle permet de retirer les substances polluantes encore contenues dans les eaux usées. On utilise pour ce faire des filtres à une ou plusieurs couches, ainsi que des filtres en tissu.

Filtres à courant ascendant (illustration 2-18)

Les eaux usées traversent les différents éléments de ces filtres de bas en haut. Le sable pollué est aspiré vers le haut en permanence par une pompe Mammot. Après élimination des substances polluantes et du sable, séparés selon leur densité, les eaux boueuses sont renvoyées dans le bassin de décantation primaire et le sable retombe dans le lit filtrant.

Filtres à lit profond (illustration 2-19)

Ces modèles sont conçus de manière que les eaux usées les traversent de haut en bas. Ils doivent être lavés au moins une fois par jour, au moyen d'air comprimé et d'eau sous pression.



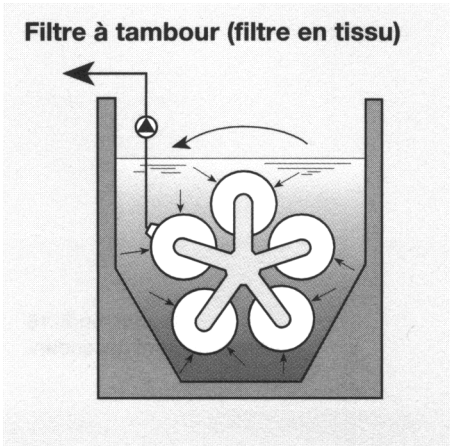


Illustration 2-20
Filtre à tambour

Qu'ils soient constitués d'une ou de plusieurs couches, les filtres sont soumis à une pression hydraulique telle qu'ils doivent avoir leur propre station de pompage.

Le lavage des différents types de filtres requiert de l'électricité et nécessite, par temps sec, les volumes d'eau suivants (en % du volume d'eaux usées épurées [40])

- filtre à lit profond 2- 6%
- filtre à courant ascendant 17 - 36%
- filtre superficiel 3- 7%
- filtre à tambour 6-35%

Outre les installations de pompage et de lavage, la recirculation des eaux boueuses, l'oxygénation des eaux brutes et l'apport de produits chimiques requièrent de l'électricité.

Filtre superficiel

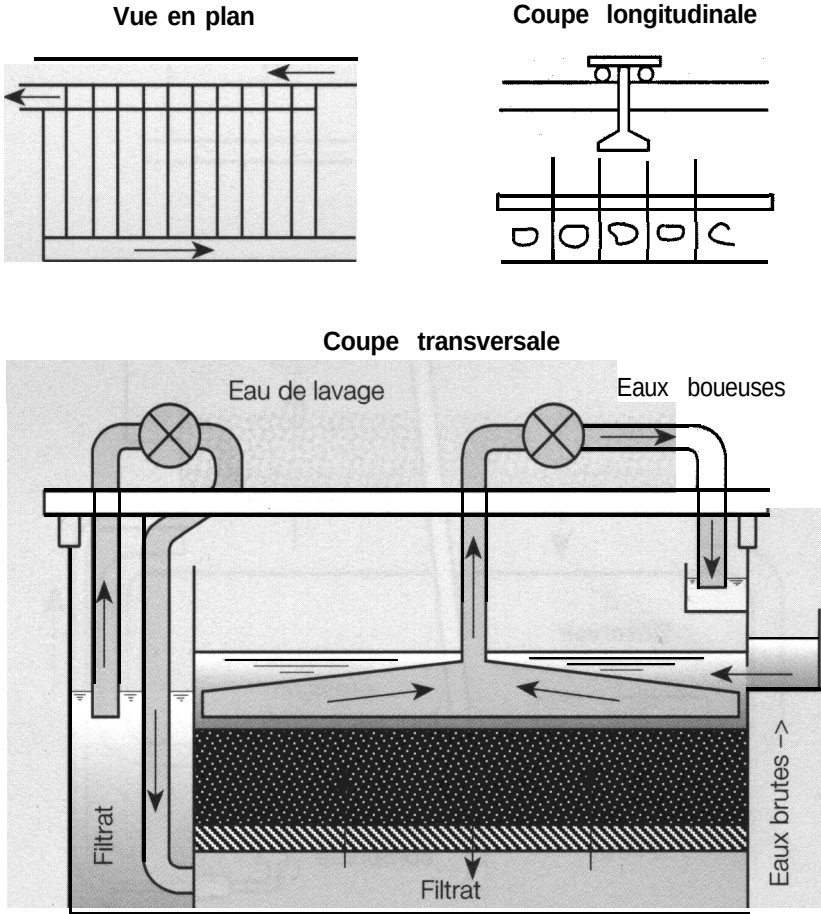


Illustration 2-21
Filtre superficiel

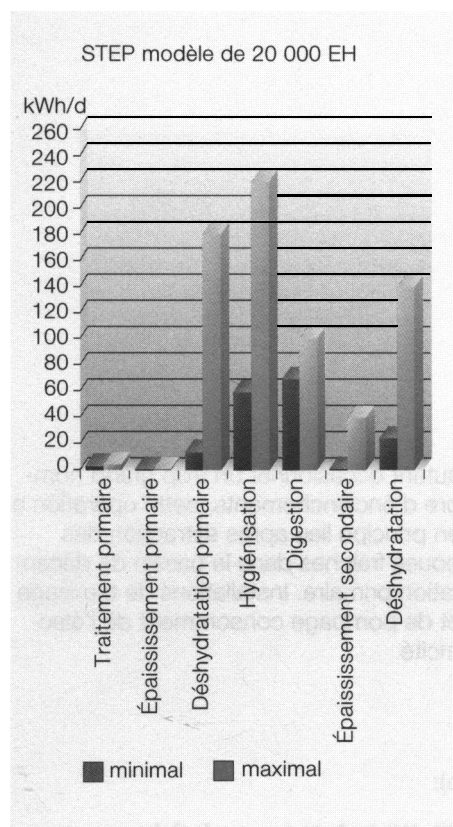


Illustration 2-22
Consommation d'électricité requise par le traitement des boues
Répartition par phase

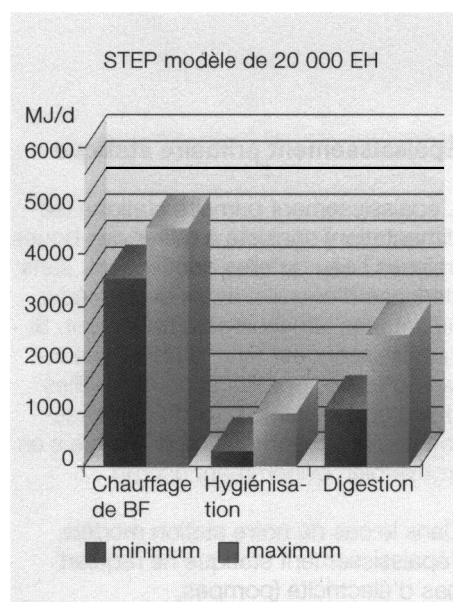


Illustration 2-23
Consommation d'énergie thermique requise par le traitement des boues
Répartition par phase

2.4 Le traitement des boues

Les boues d'épuration peuvent être:

- valorisées à des fins agricoles
- incinérées
- mises en décharge.

D'un point de vue strictement financier, leur valorisation sous forme liquide est la plus intéressante, car le bilan énergétique est alors quasiment équilibré (substitution d'engrais du commerce). Dans les autres cas (engrais sec, incinération et mise en décharge), elles doivent au préalable être déshydratées, ce qui requiert bien évidemment une certaine quantité d'électricité.

Celle-ci varie en fonction de la teneur en matière sèche (MS) des boues, car elles doivent être pompées à plusieurs reprises pour éviter les pertes de charge des machines, les pertes par frottement des tuyaux, etc. Or, plus la teneur de MS est élevée, plus le volume de boues est réduit et, partant, moins les pompes sont sollicitées. La teneur de MS joue également un rôle important pour ce qui est de la consommation de chaleur. Énergétiquement parlant, il convient donc, à chaque étape du traitement, que la teneur en MS soit la plus élevée possible, tout en restant dans des limites acceptables pour leur exploitation.

Les données relatives à la consommation d'énergie électrique et thermique des différentes phases développées dans les pages suivantes incluent à chaque fois la part imputable aux quantités consommées par les pompes.

Énergie électrique et thermique requise par le traitement des boues: respectivement un et quatre cinquièmes de la consommation totale.

2.4.1

L'élimination des particules grossières

Tamisage des boues

Le tamisage des boues a pour but d'en éliminer les particules les plus grossières, ce qui permet d'atténuer les perturbations d'ordre technique au cours des phases suivantes du traitement et de répondre aux exigences requises pour leur valorisation à des fins agricoles. Effectuée en discontinu, mais sans pour

autant occasionner un trop grand nombre d'enclenchements, cette opération a en principe lieu après extraction des boues fraîches dans le bassin de décantation primaire. Installations de tamisage et de pompage consomment de l'électricité.

Consommation d'électricité (STEP modèle):

spécifique	0,05	- 0,09	Wh/m ³ de boues fraîches
absolue	2,5	-	5 kWh/d

2.4.2

L'épaississement primaire

L'extraction de l'eau contenue dans les boues permet de réduire le volume de ces dernières et, par conséquent, d'économiser de l'énergie au cours des étapes suivantes de leur traitement (hygiénisation, digestion, conditionnement, élimination). L'eau ainsi recueillie est réintroduite dans le circuit d'épuration.

La consommation d'électricité requise par les différentes étapes de l'épaississement primaire (illustration 2-24) varie selon les spécificités des boues et du rendement horaire des machines.

Épaississement primaire statique

L'épaississement primaire statique (sédimentation) consiste à retirer des boues fraîches l'eau qu'elles contiennent, sans dépense d'énergie, avant de procéder aux étapes ultérieures du traitement. Si l'épaississeur est muni d'un brasseur - afin d'éviter la prolifération de lentilles d'eau et d'élever le taux d'épaississement -, la consommation d'énergie s'en trouve bien évidemment accrue.

Dans le cas de notre station modèle, l'épaississement statique ne requiert pas d'électricité (pompes, cf. chap. 2.3.2). Les installations d'une certaine importance équipée d'un brasseur, en revanche, consomment entre 20 et 60 kWh/d par bassin.

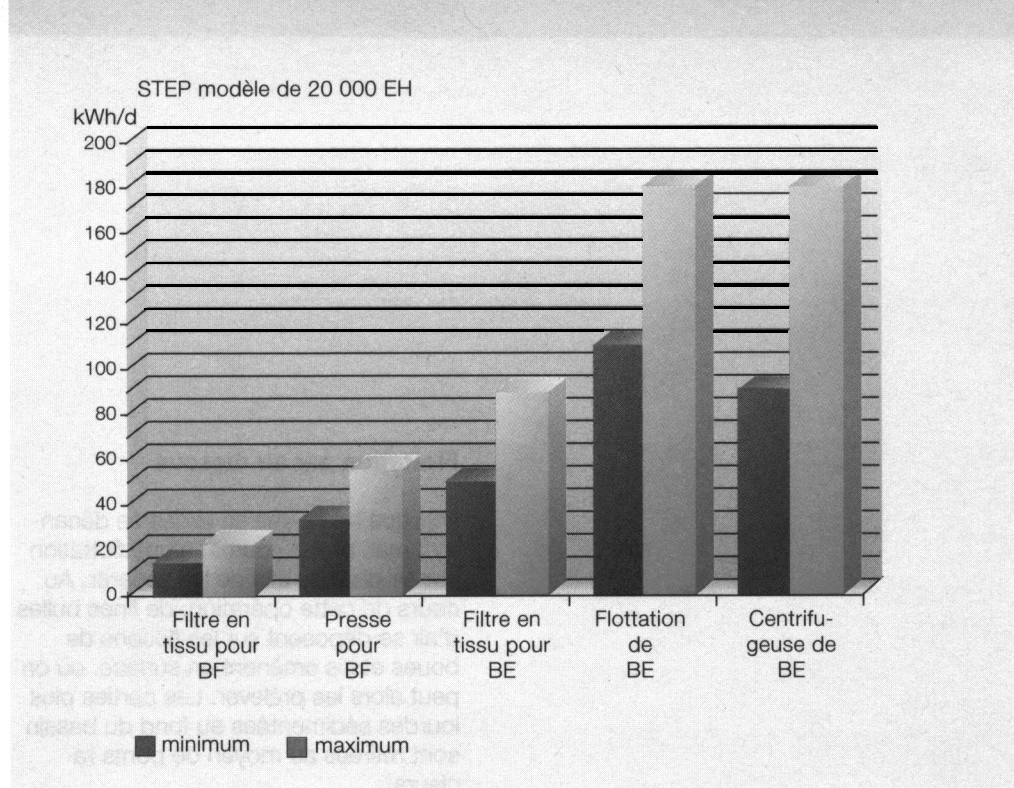


Illustration 2-24

Consommation d'électricité requise par l'épaississement primaire et la déshydratation des boues fraîches (BF) et des boues en excès (BE)

Tamissage (tambour/filtre en tissu)

Les boues fraîches et les boues en excès peuvent également être épaissies au moyen de tambours cribleurs à rotation horizontale ou de filtres à bandes pressantes. L'eau extraite (filtrat) est renvoyée dans la STEP.

Au cours de cette opération, la pompe à boues, la pompe de rinçage (effectué avec de l'eau de consommation industrielle), la préparation et le dosage des agents de floculation et le moteur entraînant le tamis rotatif consomment de l'électricité.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	0,3	- 0,5 kWh/m ³ de boues fraîches
absolue	13	- 22 kWh/d
ou		
spécifique	0,3	- 0,5 kWh/m ³ de boues en excès
absolue	50	- 90 kWh/d

Presse à boues

Dans une presse à boues, ces dernières sont floculées et décantées, puis pressées (vis de déshydratation), ce qui permet de déshydrater aussi bien les boues fraîches que les boues digérées.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	15	- 25 kWh/t MS de boues fraîches
absolue	33	- 55 kWh/d

Décanteur

Cet appareil sert à épaissir les boues en excès, les boues fraîches et les boues digérées (cf. chap. 2.45).

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	100	- 200 kWh/t MS de boues en excès
absolue	90	- 180 kWh/d

Flottation par air dissous

Lorsque les boues en excès se décantent mal, on les soumet à une flottation par air dissous afin de les séparer. Au cours de cette opération, de fines bulles d'air se déposent sur les flocons de boues et les amènent en surface, où on peut alors les prélever. Les parties plus lourdes sédimentées au fond du bassin sont retirées au moyen de ponts racleurs.

L'électricité est ici requise pour compresser l'air, élever la pression, relever les boues fraîches et actionner les moteurs des ponts racleurs.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	120 - 200 kWh/t MS de boues en excès
absolue	110 - 180kWh/d

2.4.3 L'hygiénisation

L'hygiénisation consiste à amener les boues à une température de 60 à 75°C afin de tuer les agents et germes pathogènes. Elle peut se faire de différentes manières que voici.

Pasteurisation

Les boues sont chauffées et maintenues, pendant 20 à 30 minutes, à une température de pasteurisation d'environ

75°C. L'opération se déroulant en circuit fermé et en permanence, elle ne dégage aucun effluent gazeux.

Consomment de l'électricité:	- les pompes d'alimentation. - les dispositifs de brassage et de circulation, - les pompes de circulation pour la récupération des rejets thermiques, - etc.
------------------------------	--

Requièrent de l'énergie thermique:	- le chauffage des boues, - les pertes de transmission de l'installation, - les pertes de production et de distribution.
------------------------------------	--

(Pour l'optimisation de l'énergie thermique, voir chap. 5.2)

Une fois pasteurisées, les boues doivent être refroidies avant d'arriver dans le digesteur. Les rejets thermiques récupérés au cours de cette opération sont utilisés pour préchauffer les boues fraîches. Quant à la chaleur résiduelle des boues pasteurisées, elle permet de cou-

vrir les pertes de transmission du digesteur et d'obtenir la température nécessaire à la stabilisation mésophile. Seul besoin d'énergie thermique non couvert au cours de cette opération: les pertes de transmission de l'installation de pasteurisation.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	1,4 - 2,1kWh/m ³ de boues fraîches
absolue	60 - 90 kWh/d

Consommation d'énergie thermique (station modèle, pertes de transmission uniquement):

spécifique	6 - 12 MJ/m ³ de boues fraîches
absolue	280 - 550 MJ/d

Fermentation aérobique thermophile

Au cours du processus biologique, le chauffage externe ajouté au chauffage par réaction exothermique permet, pour autant que la température de situe entre 60 et 65°C de détruire durablement les

agents pathogènes et, selon les cas, d'accroître les capacités de pompage et d'épaississement. L'installation reçoit une charge toutes les 24 heures.

Consomment de l'électricité: - les pompes (d'alimentation, de circulation, de vidange, de récupération des rejets thermiques)
- l'apport d'air comprimé
- le traitement des effluents gazeux (év.)

Pour ce qui est de l'énergie thermique, les quantités disponibles et nécessaires sont respectivement fournies et consommées par les mêmes moyens ou procédés. Toutefois, les pertes de transmission sont plus élevées dans les installations d'une certaine importance, car

le temps de séjour y est plus long. A relever encore que la chaleur contenue dans l'air de procédé - en quantité non négligeable - n'est pas récupérée et que cet air, malodorant, doit être épuré (cf. chap. 2.55)

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	3 - 5 kWh/m ³ de boues fraîches
absolue	150 - 220 kWh/d

Consommation d'énergie thermique (station modèle, transmission et effluents gazeux):

spécifique	13 - 23 MJ/m ³ de boues fraîches
absolue	660 -1000 MJ/d

Traitement à la chaux

Autre procédé d'hygiénisation: le chaulage des boues, qui requiert une déshydratation préalable. Par l'adjonction de chaux vive (CaO), les boues atteignent un pH de 11 et une température supérieure à 60°C, entraînant une stabilisation et une hygiénisation durables des boues.

Le transport et le brassage des boues et de la chaux consomment de l'électricité.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	5 - 7 kWh/ m ³ de boues déshydratées
absolue	30 - 45 kWh/d

2.4.4 La stabilisation

La stabilisation des boues fraîches a pour but de les désodoriser et de les hygiéniser, ainsi que de les préparer aux phases ultérieures du traitement (la déshydratation, par exemple).

Cette opération peut être effectuée avec ou sans apport d'oxygène (stabilisation aérobie ou anaérobie), à froid (psychrophile) ou à chaud (mésophile, thermophile).

Stabilisation aérobie psychrophile (stabilisation à froid avec apport d'oxygène)

Cette méthode (utilisée dans les petites STEP) permet d'obtenir une stabilisation partielle. L'électricité consommée est requise pour faire circuler les boues et pour actionner les dispositifs de brassage, les soufflantes et les pompes.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	5 - 7 kWh/m ³ de boues fraîches
absolue	220 - 310 kWh/d

Hypothèse:
temps de stabilisation à partir de boues fraîches: 10 jours



Stabilisation aérobie thermophile

Ce procédé est très semblable à celui de la fermentation aérobie thermophile. Une différence toutefois: la seconde opération est axée sur l'hygiénisation des boues, alors que la première, au cours de laquelle le temps de séjour est plus long, permet de dégrader les composés qui ne peuvent l'être au moment de la digestion des boues ni lorsque le temps de réaction est trop court. La puissance des réacteurs chimiques est fonction du temps de séjour (de 1 à 4 jours). L'installation, alimentée par charges, requiert une grande consommation d'énergie et beaucoup de place, raison pour laquelle elle n'est pas très usitée.

La consommation énergétique requise par la stabilisation aérobie thermophile est nettement supérieure à celle de la fermentation aérobie thermophile, car le temps de séjour est plus long et le volume des réservoirs plus important.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	7 - 15 kWh/m ³ de boues fraîches
absolue	300 - 660 kWh/d

Consommation d'énergie thermique (station modèle):

spécifique	50 - 80 MJ/m ³ de boues fraîches
absolue	2200 - 3500 MJ/d

Stabilisation anaérobie mésophile

(fermentation méthanique, digestion des boues)

Lors de la digestion des boues, les composés organiques sont dégradés par des microorganismes anaérobies: le carbone est transformé en méthane et en dioxyde de carbone (température optimale: 33 à 38°C). Par ailleurs, cette opération permet de préparer les boues en vue de leur épaissement secondaire et de leur déshydratation ainsi que d'en atténuer l'odeur.

Pompes d'alimentation du digesteur et de recirculation des boues, transport des boues par des échangeurs de chaleur, brasseurs compresseurs: tels sont ici les consommateurs d'électricité.

Il faut également de l'énergie pour amener les boues d'une température de 8-20°C à 33-38°C (chapitre 2.4.3, „L'hygiénisation”).

La quantité d'énergie thermique requise pour compenser les pertes de transmission du digesteur est élevée, car la température du procédé est, en moyenne annuelle, d'environ 25 K supérieure à la température extérieure. A relever qu'une bonne isolation du digesteur permet de réduire notablement les pertes de transmission.

Consommation d’électricité (station modèle):

spécifique	1,6 - 2,3 kWh/m ³ de boues fraîches
absolue	7 0 - 100 kWh/d

Consommation d’énergie thermique (station modèle):

spécifique	130 - 80 MJ/m ³ de boues fraîches
absolue	5700 - 7900 MJ/d

Stabilisation anaérobie psychrophile
(digestion à froid)

Dans les STEP de petite dimension, il n’est en général pas nécessaire d’isoler le digesteur ni d’installer un système de production de chaleur. La stabilisation à froid provoque une dégradation des substances organiques, atténue les odeurs et prépare les boues en vue de leur déshydratation. Le taux de dégradation est toutefois nettement inférieur à celui que l’on obtient par stabilisation anaérobie mésophile.

Autres comparaisons entre la stabilisation à froid et à chaud: le besoin énergétique de la première est beaucoup moins important que pour la seconde, et le gaz de digestion peut être valorisé dans le second cas, mais pas dans le premier. Le bilan énergétique de la stabilisation anaérobie psychrophile est donc moins bon.

Consommation d’électricité (station modèle):

spécifique	0,9 - 1,1 kWh/m ³ de boues fraîches
absolue	40 - 50 kWh/d

Le bilan énergétique de la digestion à froid est plus mauvais qu’à chaud, où les gaz de digestion de haute valeur énergétique peuvent être récupérés.

2.4.5
La réduction du volume
des boues

La déshydratation des boues permet d'en réduire le volume et de rationaliser les opérations ultérieures. La teneur en matière sèche (MS) des différents types de boues joue un rôle capital (cf. tableau 2-25). Si la masse sèche dépend du volume d'eaux usées traitées et du procédé de déshydratation, il est en revanche possible d'influer sur la teneur en MS. Bien que faible, cette marge d'influence n'est pas à négliger. Prenons l'exemple des boues fraîches: en élevant la concentration de MS de 4 à 5%, on en réduit le volume de 20%, ce qui permet d'économiser de l'énergie à l'étape suivante (pompage).

L'illustration 2-26 montre la réduction de volume en fonction de la teneur en MS pour une masse de MS constante. Le tableau 2-25 et l'illustration 2-27 indiquent les volumes correspondants pour la STEP modèle.

Du point de vue énergétique, la méthode la plus favorable pour réduire le volume des boues consiste à procéder à un épaississement (secondaire) statique. En effet, tous les autres procédés de déshydratation requièrent l'utilisation de machines plus ou moins gourmandes ainsi que d'agents de floculation. La dimension des machines influe notablement sur la consommation spécifique d'électricité: les petits modèles à rendement horaire faible (300 kg MS/h, p. ex.) consomment jusqu'à 50% d'électricité de plus que les modèles deux fois plus grands.

Table with 6 columns: Types de boues, MS (%), MS (kg), Volumes (m³), MS (kg), Volumes (m³). Rows include Boues en excès (BE), Boues fraîches (BF) épaissies, Boues digérées (BD), and Boues déshydratées with varying MS percentages and volumes.

Tableau 2-25
Teneur en MS et volume des différents types de boues
Exemples: base de référence de 1000 kg MS et STEP modèle

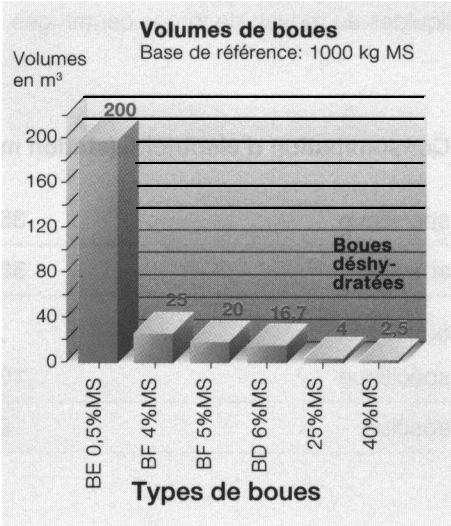


Illustration 2-26
Volume de boues en fonction de la teneur en MS (masse sèche constante)

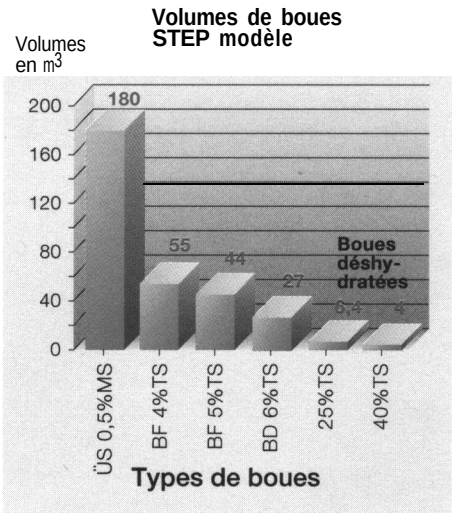


Illustration 2-27
Volume de boues en fonction de la teneur en MS (STEP modèle)

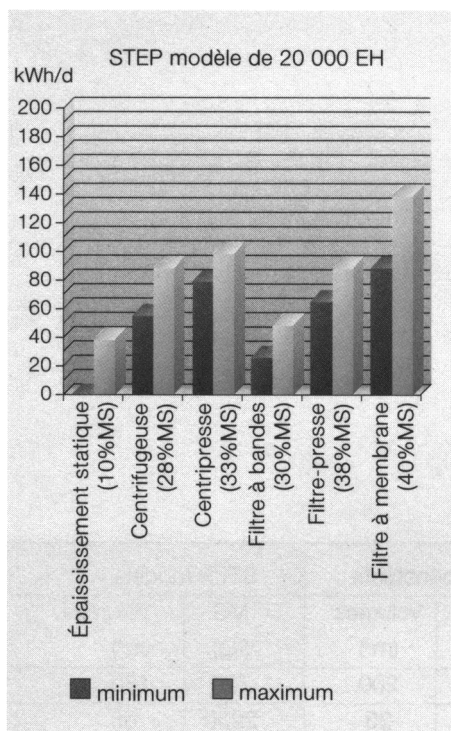


Illustration 2-28
Consommation d'électricité requise pour l'épaississement secondaire et la déshydratation des boues d'épuration

L'illustration 2-28 révèle la consommation électrique requise par les différents procédés d'épaississement secondaire décrits ci-après. Tout comme pour l'épaississement primaire, celle-ci est fonction des propriétés des boues, de la méthode de déshydratation utilisée et du rendement horaire des machines.

Épaississement secondaire statique (stockeur de boues)

(Semblable à l'épaississement primaire, mais pour des boues digérées, cf. chap. 2.4.2)

Les réservoirs en forme d'entonnoir peuvent être utilisés sans dispositifs de brassage; les réservoirs à fond plat ou faiblement incliné, par contre, doivent être équipés de brasseurs - afin d'éviter tout dépôt - qui sont actionnés à une fréquence déterminée par le volume de remplissage.

Il faut également de l'électricité pour le transport des boues et, éventuellement, des eaux boueuses (cf. chap. 2.3.2). Celui-ci est effectué au moyen de pompes qui doivent être intégrées à la station de pompage de la phase ultérieure de traitement, la déshydratation, par exemple.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	0 - 1,5 kWh/m ³ de boues digérées
absolue	0 - 40 kWh/d

Décantation (par centrifugation)

Au cours de cette opération - qui vise à réduire le volume des boues -, les particules solides sont séparées des boues liquides au moyen de forces centrifuges.

L'électricité est requise en premier lieu pour entraîner la centrifugeuse, mais aussi pour transporter les boues digérées, les boues épaisses et le centrat, ainsi que pour préparer et doser les agents de floculation.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	35 - 55 kWh/t MS de boues digérées
absolue	55 - 90 kWh/d
ou	
spécifique	100 - 200 kWh/t MS de boues en excès
absolue	90 - 180 kWh/d

Centripresse

La centripresse, munie d'une vis sans fin et installée dans une zone de compression, est une centrifugeuse qui permet d'accroître la déshydratation des particules solides décantées une fois franchie la zone d'épuration et de sédimentation. On obtient ainsi une concentration de MS d'au moins 5% supérieure à celle que permet d'atteindre la centrifugeuse.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	50 - 60 kWh/t MS de boues digérées
absolue	80 - 100 kWh/d

Filtre à bandes

Le filtre à bandes permet d'extraire les eaux boueuses en pressant les boues entre deux bandes filtrantes. Celles-ci sont lavées en permanence avec de l'eau de consommation industrielle.

L'entraînement des bandes filtrantes, le transport des boues digérées, des boues épaisses, du filtrat et de l'eau de consommation industrielle, ainsi que la préparation et le dosage des agents de floculation requièrent de l'électricité.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	15 - 30 kWh/t MS de boues digérées
absolue	25 - 50 kWh/d

Filtre-presse

Il s'agit, là également, de presser les boues (pression: 15 bars environ): les filtres, en tissu, sont disposés entre des plaques. L'installation fonctionne en discontinu.

Consomment de l'électricité:

- la pompe d'alimentation des boues,
- la pompe de mise en pression,
- l'installation de préparation et de dosage des agents de floculation,
- l'installation de transport des matières solides,
- les pompes de lavage et d'amenée d'eau (de consommation industrielle).

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	40 - 55 kWh/t MS de boues digérées
absolue	65 - 90 kWh/d

Filtre à membranes

(High Intensity Press, HIP)

On utilise des filtres à membranes lorsque la teneur en MS des boues déshydratées par décantation, filtres à bandes, etc. (env. 25-35% MS) doit être

élevée sans apport de substances. L'accroissement ainsi obtenu est d'environ 10%.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	55 - 85 kWh/t MS de boues digérées déshydratées
absolue	90 - 140 kWh/d

2.4.6

Leséchagedesboues

Les installations de séchage des boues sont, le plus souvent, utilisées à l'échelle régionale. En voici une brève description, bien qu'elles n'entrent pas dans le cadre du présent manuel [8].

Le chauffage et la vaporisation de l'eau requièrent une grande quantité d'énergie thermique. La consommation énergétique dépend du système de déshydratation.

Le séchage thermique permet d'atteindre une teneur en MS de 95%. Les

boues atteignant une température de l'ordre de 100°C il provoque en outre une hygiénisation parfaite.

L'entraînement des installations de transport, de brassage, de séchage, de ventilation, etc. requièrent de l'électricité.

Les rejets thermiques récupérés lors de la condensation de la vapeur d'eau et du refroidissement de l'eau sont utilisés pour préchauffer les boues froides.

Consommation d'énergie par m³ de boues déshydratées:

(teneur en MS de 25%, sans récupération de chaleur)

Électricité	env. 30 - 40	
Énergie thermique	Chauffage de 20°C à 100°C	287 MJ/m ³
	Vaporisation de l'eau (jusqu'à 10% de teneur en eau)	1'629 MJ/m ³
	Pertes thermiques (transmission, etc.)	192 MJ/m ³
	Pertes des producteurs de chaleur	127 MJ/m ³
Énergie thermique finale: total		2'235 MJ/m ³
(= 621 kWh/m ³)		

2.4.7

Le compostage des boues

Les boues déshydratées peuvent être hygiénisées et stabilisées par compostage mélangé. On recourt de préférence à ce procédé pour traiter les boues partiellement stabilisées issues des bassins d'oxydation totale ainsi que les boues digérées, si possible déjà déshydratées.

Moyennant l'adjonction d'un support carboné et le brassage régulier en milieu aérobie, les boues peuvent être valorisées à des fins agricoles.

Cette opération requiert de l'électricité pour le transport des boues (aller et retour) ainsi que pour leur brassage.

Consommation d'électricité (station modèle):

spécifique	4 - 12 kWh/m ³ de boues digérées déshydratées
absolue	25 - 75 kWh/d

2.4.8

L'entreposage provisoire (réservoir)

Une fois traitées, les boues - qu'elles soient humides ou sèches - doivent être stockées pendant plusieurs mois. Leur transport à l'intérieur de la STEP, leur brassage et leur chargement requièrent de l'énergie. Une planification appropriée permet de réduire le besoin énergétique au minimum.

La forme d'entreposage la plus répandue pour les boues liquides ainsi que la consommation énergétique y relative sont décrites au chap. 2.4.5 (Réduction du volume des boues). Pour les autres types de boues, déshydratées ou sèches, il est impossible de déterminer la consommation d'énergie requise par leur stockage.

2.5 L'infrastructure

2.5.1 L'approvisionnement en eau

Les stations d'épuration sont équipées de systèmes d'approvisionnement en eau potable et en eau de consommation industrielle.

Eau potable

L'eau potable, provenant en règle générale du réseau public, est distribuée à l'intérieur de la STEP par un réseau interne. Sa distribution ne requiert pas d'énergie, car la pression du réseau est suffisante. La consommation d'eau potable peut être maintenue à un minimum dès lors qu'on utilise, en parallèle, de l'eau de consommation industrielle.

Le besoin d'eau chaude d'une STEP est faible: il se limite au laboratoire et aux douches.

Eau de consommation industrielle

Cette eau est utilisée comme eau de rinçage et de lavage. Il s'agit en fait d'eau usée épurée qui, selon son affectation, doit faire l'objet d'un filtrage préalable. L'approvisionnement est assuré par l'intermédiaire d'un réservoir d'air comprimé (chauffe-eau à accumulation et pression de 6 à 10 bars).

Il faut de l'énergie pour élever la pression du réseau et pour alimenter l'installation de filtrage mécanique (évent.)

Consommation d'électricité (sans rapport avec la STEP modèle):

env. 0,25 - 0,50 kWh/m d'eau de consommation industrielle

2.5.2 L'air comprimé

L'air comprimé est utilisé à divers niveaux de pression et en quantités variables.

L'installation à boues activées en requiert un gros volume, diffusé par le biais de soufflantes (cf. chap. 3.8.2).

Le dessableur aéré, lui aussi muni de soufflantes, nécessite également un apport d'air comprimé, mais en quantités bien moindres et à une pression nettement moins élevée (cf. chap. 3.8.2).

En faible quantité, mais à une pression assez élevée (surpression de quelques bars), enfin, l'air comprimé est utilisé pour la commande des dispositifs hydrauliques ainsi que dans les ateliers. La consommation d'énergie est faible, pour autant que le réseau d'air comprimé soit étanche et correctement dimensionné.

Consommation d'électricité (sans rapport avec la STEP modèle):

0,1 kWh/Nm³ d'air comprimé (par aspiration)

2.5.3 Le chauffage

Le plus souvent, les locaux et les procédés sont alimentés en chaleur par l'intermédiaire d'un réseau d'eau chaude (départ et arrivée de la chaudière) dont la température maximale est de 80 à 90°C. Au début de leur exploitation, quelques STEP étaient équipées de chaudières à vapeur à basse pression pour le chauffage direct du digesteur, mais ces dernières sont peu à peu remplacées par des chaudières à eau chaude.

La production et la distribution de chaleur sont soumises aux directives et lois en vigueur.

Pompes de circulation et brûleurs requièrent de l'électricité (production de chaleur conventionnelle, cf. chap. 5.4, couplage chaleur-force, cf. chap. 6).

Consommation d'électricité (STEP modèle):
absolue 10 - 30 kWh/d (période de chauffage)

2.5.4 La ventilation

Lorsque les STEP situées à proximité de zones d'habitation ou de détente font l'objet d'une rénovation, il convient de réduire leurs émissions sonores et olfactives. Pour ce faire, les sources d'émissions sont mises sous cloche et doivent, le plus souvent, être ventilées par voie mécanique.

Il est impossible de déterminer la consommation énergétique en fonction du volume d'eaux usées et de boues. A titre indicatif, on peut cependant estimer la consommation d'électricité quotidienne requise pour un débit d'air (apport ou rejet) de 1000 m³/h et des pertes de pression moyennes.

Consommation d'électricité
5 - 8 kWh/d pour 1000 m³/h d'air

Selon les spécificités des différentes installations d'une STEP, la ventilation peut constituer une part importante du besoin énergétique global (cf. chap. 3.8.3).

2.55 L'épuration de l'air évacué

Lorsque la ventilation a pour but de réduire les émissions olfactives, l'air évacué doit quasiment toujours être épuré, soit par voie chimique, soit par voie biologique. La consommation d'énergie spécifique varie considérablement.

Le lavage de l'air évacué s'effectue en deux ou trois temps. La circulation de l'eau, le transport et le dosage des produits chimiques consomment de l'énergie.

Pour ce qui est de la méthode biologique, l'énergie est nécessaire pour le transport de l'air et pour l'humidification éventuelle du système.

Dans certaines STEP, l'air évacué est insufflé dans le bassin d'aération afin d'en atténuer l'odeur nauséabonde.

Ce mode d'épuration donne de bons résultats. De plus, il est plus simple à mettre en œuvre que les autres systèmes. Son utilisation ne se prête toutefois pas dans les cas où les eaux usées contiennent des composés organiques volatils dégageant des odeurs.



3. Les économies d'énergie au niveau technique

3.1 Introduction	56
3.2. Le réseau de canalisations	59
3.2.1 Les ouvrages de déversement/Les bassins d'eaux pluviales	59
3.2.2 Le volume d'eaux usées	59
3.3 Le dimensionnement des STEP	60
3.3.1 Dimensionnement hydraulique	60
3.2.2 Dimensionnement des machines	60
3.4 Les stations de relevage et de pompage	62
3.4.1 Les types de pompes	62
3.4.2 Optimisation des stations de pompage	64
3.5 L'installation à boues activées	66
3.5.1 Rôle du système d'aération	66
3.5.2 Le système d'apport d'air	67
3.5.3 Les systèmes d'apport d'air: choix et optimisation	72
3.5.4 La production d'air comprimé	75
3.5.5 Régulation de l'apport d'oxygène	75
3.6 La filtration	76
3.7 Le traitement des boues	60
3.7.1 Introduction	80
3.7.2 L'épaississement primaire	80
3.7.3 L'hygiénisation	81
3.7.4 La digestion des boues	82
3.7.5 La déshydratation des boues	83
3.6 L'infrastructure	88
3.8.1 L'eau potable et l'eau industrielle	88
3.8.2 L'air comprimé	88
3.8.3 L'épuration de l'air de ventilation et de l'air vicié	90
3.9 Tableaux synoptiques des mesures à prendre	92

3.1 Introduction

Si la principale source d'économie d'énergie se situe au niveau du traitement biologique (cf. chap. 3.5) il est cependant également possible de réduire la consommation énergétique des stations de relevage et de pompage (cf. chap. 3.4) ainsi que, dans une moindre mesure, du traitement des boues (cf. chap. 3.7).

L'expérience a montré que l'optimisation énergétique d'une STEP devait porter non seulement sur chacune de ses composantes et chacun des procédés, mais également sur l'installation en tant qu'entité globale. C'est dire qu'un grand nombre de facteurs entrent en ligne de compte:

- le volume d'eaux usées: quantité et qualité actuelles et futures, compte tenu du bassin versant (industrie, artisanat, commune, plan de zones, plan général d'évacuation des eaux et plan directeur des égouts, évolution probable);
- le réseau de canalisations: exploitation et besoin d'assainissement (système unitaire ou séparatif, décharges d'eaux pluviales, traitement des eaux de pluie, évolution probable);
- la qualité d'épuration requise;
- les modes d'élimination des boues;
- les étapes supplémentaires d'épuration probables;
- le site (émissions olfactives et sonores, topographie, pente hydraulique);
- les lois et directives;
- les techniques de procédé actuelles et futures;
- la structure d'exploitation: personnel, horaires, surveillance, etc.;
- la sécurité de l'exploitation,

Première étape d'une optimisation énergétique: dimensionner très précisément les différentes composantes de la STEP et supprimer toutes réserves inutiles.



3.2. Le réseau de canalisations

3.2.1 Les ouvrages de déversement/ Les bassins d'eaux pluviales

Le réseau de canalisations, les ouvrages de déversement et les bassins d'eaux pluviales doivent être conçus de façon que les pertes hydrauliques soient aussi faibles que possible, afin de réduire la hauteur de relevage des eaux et, par-tant, l'énergie consommée par les pom-pes.

Lorsque la station de relevage se trouve à l'entrée de la STEP, il faut, dans la mesure du possible, placer les bassins d'eaux pluviales en amont de la station, afin d'éviter que les pompes ne relèvent de grandes quantités d'eaux mixtes qui doivent ensuite être déversées dans l'exutoire (illustrations 3-1 et 3-2).

Il est par ailleurs recommandé, pour des raisons liées à la protection des eaux et à la sécurité de l'exploitation, de renon-cer à tout déversement intermédiaire à l'intérieur de la STEP, après la phase de décantation primaire, par exemple (illus-trations 3-1 et 3-2).

Lorsque les bassins d'eaux pluviales sont rincés par voie mécanique, le vo-lume de boues dans la STEP augmente. Il en résulte une augmentation de la consommation d'énergie directe et indi-recte, requise respectivement pour les bassins et pour les différentes étapes de traitement des boues.

3.2.2 Le volume d'eaux usées

Le volume d'eaux usées aboutissant dans une STEP (QTS et QTP) doit être réduit au minimum, afin de limiter la consommation d'énergie. Cet objectif peut être atteint en prenant des mesu-res auprès des consommateurs

(cf. chap. 2.1), en réduisant le volume d'eaux claires parasites et en limitant la part d'eaux de pluie à l'entrée de la STEP.

Pour des raisons éner-gétiques également, les eaux claires parasites ne doivent pas être dirigées dans les canalisations d'eaux polluées, mais éliminées conformément aux prescriptions en vigueur. En effet, ces eaux non polluées élè-vent inutilement la charge hydraulique de la STEP. Le volume d'eaux claires parasites - eau de refroidissement, trop-pleins de résér-voirs, captage d'eau de source, fontaines publi-ques, etc. - peut être réduit par recirculation, infiltration ou déversement direct dans l'exutoire [24].

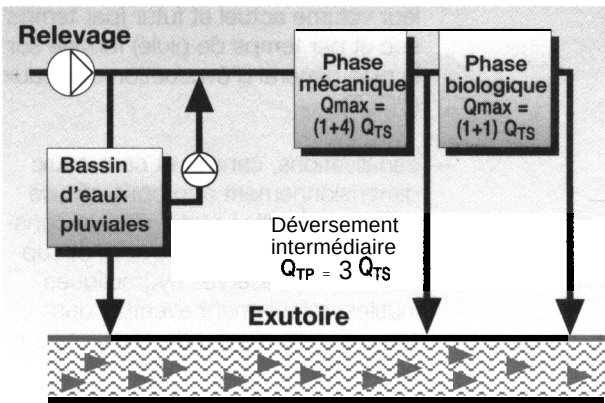


Illustration 3-1
Exemple de plan hydraulique à ne pas suivre: bassin d'eaux pluviales placé après la station de relevage, déversement intermédiaire à l'intérieur de la STEP

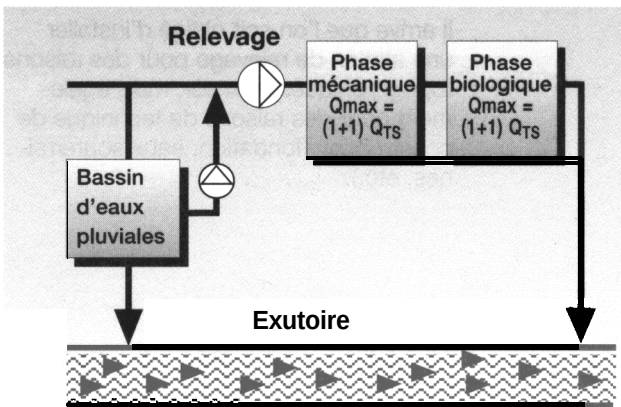


Illustration 3-2
Exemple de plan hydraulique à suivre: bassin d'eaux pluviales placé avant la station de relevage, pas de déversement intermédiaire à l'intérieur de la STEP

3.3 Le dimensionnement des STEP

3.3.1 Dimensionnement hydraulique

La première étape d'une optimisation énergétique consiste à définir grandeurs et volumes:

- eaux usées: détermination précise de leur volume actuel et futur (par temps sec et par temps de pluie) fondée sur le plan général d'évacuation des eaux (PGEE);
- canalisations, canaux et caniveaux: dimensionnement approprié afin de réduire les pertes hydrauliques: construction de canaux sans seuil et suppression de réserves hydrauliques inutiles; refoulement éventuel des eaux dans le réseau de canalisations en cas de Q_{max} ;
- composantes de la STEP: les disposer de façon à réduire au minimum la longueur des transports d'eaux et de boues.

Il arrive que l'on soit obligé d'installer une station de relevage pour des raisons topographiques bien sûr, mais également pour des raisons de technique de construction (fondation, eaux souterraines, etc.).

Réduire le volume des pertes hydrauliques afin d'abaisser le besoin énergétique de la station de relevage, voire de la supprimer.

3.2.2 Dimensionnement des machines

La durée de vie des STEP est de 20 à 30 ans, contre 10 à 15 pour les machines. Pour des raisons liées aussi bien à leur consommation d'énergie qu'à leur exploitation, ces dernières doivent être dimensionnées pour leur durée d'utilisation et non pour celle de la STEP, afin que leur rendement soit optimal.

Exemple

Une STEP a été conçue pour une durée de vie de 25 ans. Les calculs ont été effectués en pronostiquant une forte augmentation de charge due à l'accroissement du nombre d'habitants d'une part, et du volume d'eaux usées d'origine industrielle d'autre part (prévision: 120 000 EH). Chaque bassin de décantation secondaire est équipé d'une pompe de recirculation des boues, dimensionnée par rapport à la charge finale et réglée en fonction du volume d'eaux usées. Arrivées au terme de leur durée d'utilisation, les pompes sont encore nettement surdimensionnées, bien que la plage de réglage s'étende de 20 à 100% de la capacité maximale. Leur régime de fonctionnement étant mauvais, il en va de même de leur rendement.

L'accroissement effectif de la charge ayant été largement surestimé, les pompes, même réglées au minimum, n'arrivent pas à transporter les boues en retour, ce qui occasionne des problèmes d'exploitation.

Solution

Pour remédier à ces problèmes - et pour réduire la consommation d'énergie - , il conviendrait d'installer des pompes plus petites, de meilleur rendement et munies d'un régulateur de vitesse, qui couvriraient la charge de base (du minimum nocturne au maximum diurne par temps sec). Les grandes ne seraient plus utilisées qu'en cas de pointe et par temps de pluie.

Économie d'énergie ainsi réalisée

Consommation d'électricité

Rendement des grosses pompes	0,45	90 000 kWh/a
Rendement des petites pompes	0,75	50 000 kWh/a
Économie		40 000 kWh/a (44%)

Dimensionner les machines en fonction de leur durée d'utilisation et non en fonction de celle de la STEP.

3.4 Les stations de relevage et de pompage

3.4.1

Les types de pompes

Pompes Mammut (élévateur pneumatique)

Les pompes Mammut sont utilisées dans les STEP recevant des matériaux grossiers tels que pierres, gravier et sable. Elles sont installées à l'entrée de la STEP ainsi que dans les dessableurs circulaires. On recourt également à ce type de pompes dans les STEP compactes pour transporter les boues en retour.

Leur rendement est faible - de l'ordre de 0,3 -, car le transport est assuré par de l'air comprimé insufflé dans une colonne de liquide et l'énergie mécanique requise pour le transport produite par les différences de pression hydrostatique. La consommation d'énergie dépend du matériau transporté (eaux, boues, sable, gravier), du volume d'air et du compresseur.

Pompes centrifuges

Ces pompes sont, avec les pompes à vis, les systèmes les plus couramment utilisés dans les STEP. Il en existe plusieurs variantes que l'on distingue selon le type de roue dont elles sont munies, roue qui permet d'adapter la pompe aux besoins. Le rendement peut être accru proportionnellement à l'augmentation du volume d'eaux usées, en multipliant le nombre de canaux entre les aubes de la roue pour une même section libre. Les arêtes ont cependant tendance à s'obstruer. Le rendement de ces pompes varie entre 0,3 et 0,9 (tableau 3-3) le plus faible étant celui des pompes à roues ouvertes.

Celles-ci sont malgré tout très fréquemment utilisées pour transporter les eaux usées et les boues, car, contrairement aux pompes munies de roues à canaux ou à vis, elles ne s'obstruent pas et coûtent donc moins cher à l'entretien. Ce dernier argument l'emporte encore beaucoup trop souvent, alors même que le coût énergétique engendré par des moteurs puissants et gourmands est nettement plus élevé. Le prix de l'électricité ne cessant de croître (tarif d'hiver, renchérissement), il serait grand temps de tenir compte dans une plus large mesure de cette réalité.

Les pompes à carcasse tubulaire, très rares en Suisse, sont utilisées lorsque la hauteur de relevage est faible et que les eaux sont préalablement épurées mécaniquement.

Les pompes centrifuges à vis sont un type particulier de pompes pour eaux usées. Elles allient un rendement élevé à une capacité d'autorégulation (adaptation automatique du volume refoulé au volume d'amenée, à charge partielle). Ce comportement, analogue à celui des pompes à vis, présente des avantages non négligeables tant au niveau énergétique qu'au niveau de l'exploitation. La section est, par contre, restreinte.

Pompes à vis

Les atouts des pompes à vis se situent au niveau de l'hydraulicité et de l'exploitation, à savoir que, d'une part, leur fonctionnement s'adapte au débit et que, d'autre part, elles ne s'obstruent pas. Un inconvénient toutefois: leur hauteur de relevage est limitée et ne peut pas être modifiée une fois l'installation

Bien choisir et dimensionner les différents types de pompes, dont le rendement énergétique varie fortement,

posée, ce qui pose plus particulièrement problème pour les stations de pompage où s'effectue la recirculation des boues, car les francs-bords des bassins à boues activées sont alors surchargés.

Le rendement des pompes à vis est moyen à bon (tableau 3-4). Il croît ou décroît selon l'importance des pertes dues au jeu entre la vis et l'auge. La forme de cette dernière doit donc être réalisée avec attention.

La vis à manteau tubulaire permet non seulement d'éviter ces pertes, mais également de construire des bassins plus longs, séparés les uns des autres par des paliers intermédiaires, ce qui accroît le rendement des pompes.

Pompes volumétriques

Pour le traitement des eaux usées, les pompes à piston, coûteuses et encombrantes, sont de plus en plus remplacées par des pompes à rotor excentré, à moins que la pression requise ne soit trop élevée (traitement des boues, filtre-pressé, par exemple).

Pompes centrifuges Types de pompes et de roues	Volume refoulé	Rendement de la pompe (mesuré à l'arbre de la pompe)
Pompes à carcasse spirale ou annulaire: - Roues ouvertes - Roues à canaux	jusqu'à 100 l/s jusqu'à 1'000 l/s	0.30 - 0.50 0.50 - 0.70 0.70 - 0.82
Pompes à bâti tubulaire: - Roues à vis - Roues à hélice	jusqu'à 3'000 l/s à partir d'env. 500 l/s	0.75 - 0.85 0.80 - 0.90
Bâti spéciaux: - Roue à vis centrifuge	jusqu'à 1'000 l/s	0.60 - 0.82

Tableau 3-3
Principaux types de pompes centrifuges

Pompes à vis Type de pompes	Volume refoule	Rendement de la pompe (mesuré à l'arbre de la pompe)
- Vis - Vis à manteau tubulaire	jusqu'à 3'000 l/s jusqu'à 1'500 l/s	0.70 - 0.80 > 0.80

Tableau 3-4
Pompes à vis

Pompes volumétriques Type de pompes	Rendement de la pompe (mesuré à l'arbre de la pompe)
- Pompes à piston - Pompe à rotor excentré (pompe Moineau)	0,6 - 0.8 0.3 - 0.7

Tableau 3-4
Pompes volumétriques

3.4.2 Optimisation des stations de pompage

Pour optimiser la consommation énergétique des stations de pompage, il s'agit d'améliorer le rendement de toutes leurs composantes, à savoir notamment:

- la pompe,
- le moteur,
- le système de transmission (évent.),
- le système de régulation,

pour lesquelles un certain nombre de critères entrent en ligne de compte.

La pompe:

- adéquation de la pompe,
- dimension, choix du type de pompe,
- comportement, diagramme débit hauteur (caractéristique de la pompe),
- réglage des aubes,
- système de transmission (pour les pompes à vis, p. ex.).

Le dispositif d'entraînement:

voir chap. 4.2

L'ensemble du mécanisme:

- Analyse du système

Pompes de recirculation des boues: vérifier si la teneur en MS des boues peut être augmentée, sachant qu'une élévation de 5 à 6 g MS/l, par exemple, réduit d'un sixième l'électricité consommée par la pompe.

Pompes à vis (stations de relevage): vérifier si, pour réduire la hauteur de refoulement ($H_{Géod}$), la partie inférieure de la pompe peut être immergée; selon les cas, la vis peut même être immergée au-delà de son point de remplissage (illustrations 3-6 et 3-7).

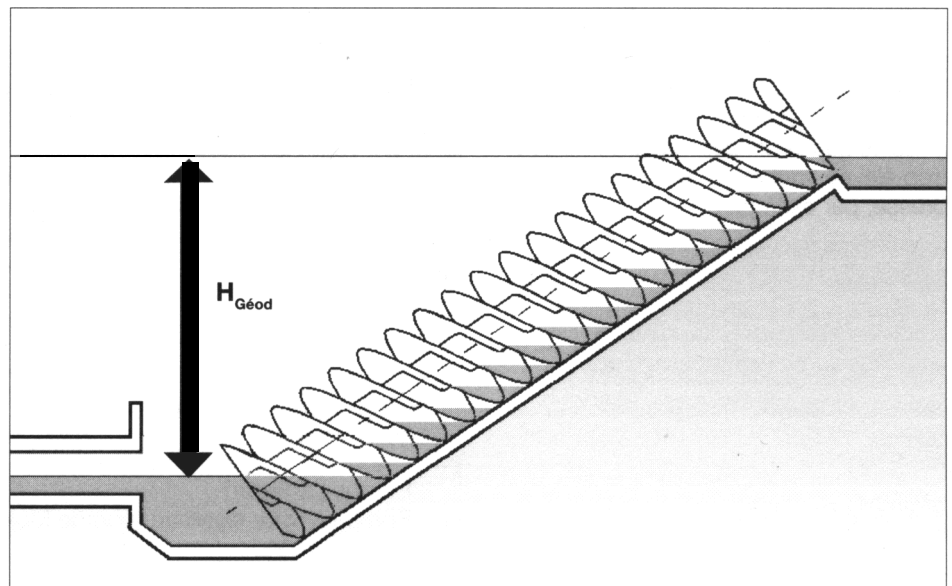


Illustration 3-6
Pompe à vis: partie inférieure non immergée

Les pompes sont alors équipées d'un régulateur de vitesse qui assure le fonctionnement des pompes en fonction du niveau d'eau.

Lorsque les pompes sont ainsi immergées, il faut veiller à ce qu'il n'y ait dans le canal d'arrivée:

- ni dépôts,
- ni déversements.

Système de régulation
autorégulation de la courbe de réduction du-débit (diagramme débit-hauteur),
service intermittent,
régulation de la vitesse,

(D'une façon générale, il convient d'utiliser des pompes réglables lorsque les volumes transportés varient beaucoup.)

- nombre de pompes,
- installation de pompes adaptées aux différentes charges: charge de base/minimale et charge de pointe (cf. chap. 3.3.2: exemple).
- Puissance
- réduction du volume à relever, de la hauteur de relevage, des distances de transport et des pertes de charge,
- optimisation de la vitesse d'écoulement (min./max.), élimination des dépôts.
- Système d'entraînement
- puissance des moteurs,
- rendement,
- domaine de fonctionnement.
- Exploitation
- propriétés des matériaux transportés,
- sécurité de l'exploitation, risques de dysfonctionnement,
- durée d'exploitation.

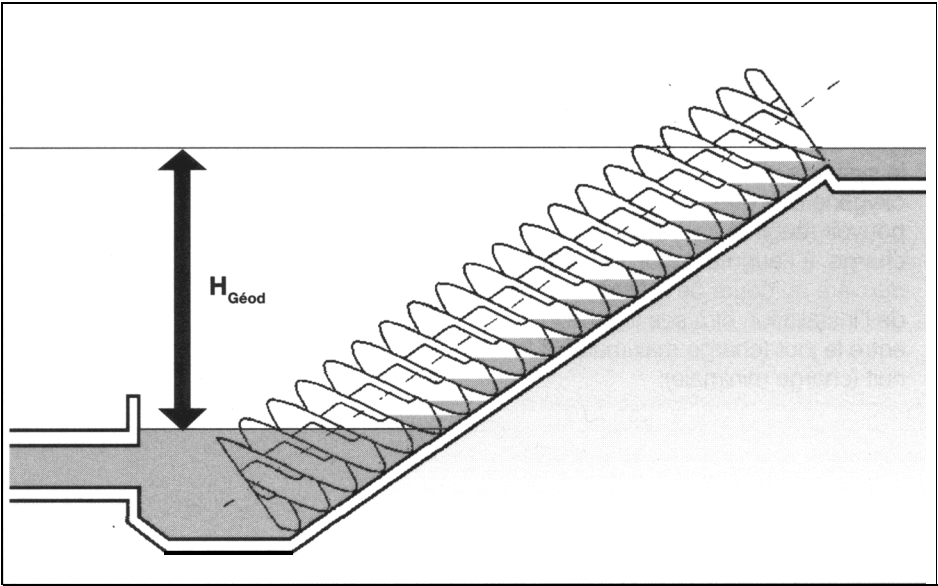


Illustration 3-7
Pompe à vis: partie inférieure immergée

3.5 L'installation à boues activées

3.5.1

Rôle du système d'aération

L'aération a pour but de fournir de l'oxygène aux flocons de boues contenus dans les bassins et de les maintenir en mouvement afin que, d'une part, l'échange de substances entre la phase aqueuse et les flocons de boues activées soit assuré et que, d'autre part, la biomasse ne se dépose pas au fond du bassin.

L'opération a également pour but de retirer de l'eau les produits cataboliques issus du processus biologique, le CO_2 notamment, car une accumulation d'acide carbonique ferait chuter le pH, ce qui entraverait le bon déroulement du processus. L'aération permet donc :

- d'oxygéner les flocons de boues activées,
- de brasser le contenu du bassin,
- d'éliminer par stripping le CO_2 produit durant le processus biologique.

Pour atteindre ces objectifs, les conditions suivantes doivent être réunies :

- le système alimentant les bassins en oxygène doit être conçu de façon à pouvoir réagir aux variations de charge, à l'augmentation de cette dernière au cours de la durée de vie de l'installation et à ses fluctuations entre le jour (charge maximale) et la nuit (charge minimale);

- pour des questions de variations de charge également, le bassin à boues activées doit être subdivisé en plusieurs zones dans chacune desquelles l'apport d'oxygène doit être réglable;
- dans les installations pourvues d'un système de nitrification fonctionnant toute l'année, une partie du bassin utilisé à cet effet peut être affectée à la dénitrification durant l'été; le système d'aération doit pouvoir être déclenché et le mélange assuré par des brasseurs.

3.5.2
Le système d'apport d'air

Pour évaluer la consommation énergétique des systèmes d'aération, on utilise comme valeur de référence l'apport d'O2, à savoir le nombre de kg d'oxygène par kWh de consommation électrique apportés dans la phase aqueuse, qui est influencé par plusieurs facteurs:

- la capacité du système d'aération,
- la composition des eaux usées,
- la géométrie du bassin à boues activées,
- la teneur en oxygène de son contenu,
- le système de production, de distribution et d'apport d'air.

l'exception de la composition des eaux usées, ces facteurs peuvent être évalués. C'est pourquoi on détermine l'apport d'O2 en divisant la quantité apportée dans les conditions d'exploitation par la quantité apportée en conditions standard (eaux propres), soit:

facteur α = (apport d'O2 dans les conditions d'exploitation) / (apport d'O2 en conditions standard)

Ce facteur α est inférieur à 1 pour la plupart des systèmes d'aération. Concrètement, cela signifie que l'apport d'O2 dans les conditions d'exploitation, déterminant pour dimensionner un système d'aération, est plus faible que l'apport en conditions standard. Ce phénomène est dû essentiellement aux substances actives flottant à la surface des eaux usées, car elles influent sur la surface de contact spécifique eau/air. Toutefois, en certaines circonstances, d'autres substances contenues dans les

eaux usées permettent d'améliorer cet apport, par exemple lorsque la salinité des eaux usées est élevée.

Les données du tableau 3-8 sont le résultat d'essais effectués avec différents systèmes d'aération pour déterminer le facteur α à partir d'apports d'O2 dans les conditions d'exploitation et en conditions standard.

Il en ressort nettement que l'apport d'O2 dans les conditions d'exploitation joue un rôle capital pour l'évaluation énergétique des systèmes d'aération. Ce dernier peut être déterminé par des mesurages sur place ou par des valeurs du facteur α enregistrées par voie empirique pour l'apport d'O2 en conditions standard.

La dépense d'énergie requise pour couvrir la demande d'oxygène varie selon que le système d'aération est:

- un aérateur de surface,
- un aérateur à air comprimé (à fines bulles, moyennes bulles ou grosses bulles),
- un aérateur à giffard,
- un aérateur à jet,
- ou une combinaison des modèles ci-dessus.

Les systèmes les plus couramment utilisés dans les STEP sont les aérateurs de surface et les aérateurs à air comprimé. Leurs valeurs d'apport d'O2 (tableau 3-9) sont la moyenne d'essais effectués sur plusieurs installations. Pour ce qui est de l'apport dans les conditions d'exploitation, on a admis un facteur α de 0,6 pour les aérateurs à air comprimé et de 0,9 pour les aérateurs de surface, indépendamment du type particulier d'aération choisi parmi ces deux systèmes.

Table with 5 columns: Aérateurs à répartition en bandes, Aérateurs couvrant le fond du bassin, Aérateurs à plaques, Aérateurs de surface. Rows include: Nombre de mesures, Valeur moyenne, Valeur minimale, Valeur maximale, and a footnote: 1) Hypothèse (aucune mesure effectuée à ce jour).

Tableau 3-8
Facteurs α des systèmes d'aération [34]

L'apport d'O₂ dans les conditions d'exploitation: un élément déterminant pour l'évaluation énergétique des systèmes d'aération.

Aérateurs de surface

L'apport d'oxygène est effectué par voie mécanique à la surface de l'eau. Au cours de l'opération, les eaux sont brassées afin de mélanger le contenu du bassin et d'éviter les dépôts de boues. Trois systèmes sont actuellement utilisés dans les STEP:

- les turbines lentes,
- les brosses (rotor Mammüt),
- les turbines rapides.

Comme le montre le tableau 3-9, l'apport d'oxygène par kWh d'électricité varie selon le système.

Apport d'oxygène et maintien en suspension des micro-organismes requièrent de l'énergie. La puissance est fonction des dimensions et du volume des bassins (cf. illustration 3-10).

Aérateurs de surface	Apport d'oxygène (en kg O ₂ kWh)			
	Eaux propres		Boues	
	bon	moyen	bon	moyen
Turbine dans le bassin à mélange intégral	1.7	1.3	1.5	1.15
Turbine dans le bassin à flux continu	2.1	1.6	1.9	1.4
Brasseur dans le bassin à flux continu	1.7	1.3	1.5	1.15

Tableau 3-9
Apport d'oxygène par les aérateurs de surface [34]

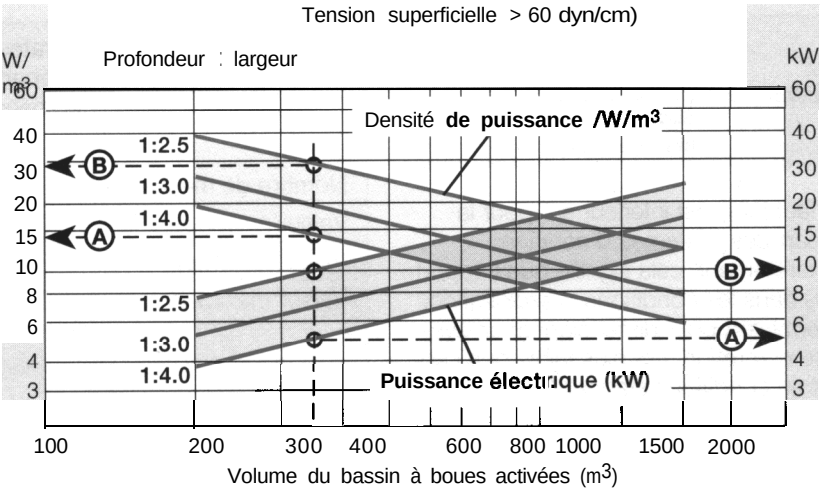


Illustration 3-10
Aérateurs de surface: puissance minimale de brassage requise pour que la vitesse d'écoulement soit suffisante au fond du bassin [26]

Les aérateurs sont souvent dimensionnés non pas en fonction du besoin d'oxygène, mais de la puissance requise pour brasser le contenu des bassins, plus élevée. Il importe donc d'opter pour des bassins peu profonds.

En effet:
l'aération d'un bassin profond (variante B) consomme deux fois plus d'énergie que celle d'un bassin peu profond (variante A) pour assurer la même fonction, à savoir éviter les dépôts (cf. exemple ci-dessous).

Aérateurs à air comprimé

Ces systèmes sont conçus de manière à insuffler l'air à plusieurs mètres de profondeur. Une partie de l'oxygène contenu dans les bulles d'air passe dans les eaux usées, en quantité très

variable selon le temps de séjour et la grosseur des bulles, la profondeur à laquelle elles sont introduites et le système utilisé: il existe en effet des systèmes à grosses bulles ($\varnothing > 4$ mm), à moyennes bulles ($3 \text{ mm} < \varnothing < 4 \text{ mm}$) et à fines bulles ($\varnothing < 3 \text{ mm}$).

Des analyses ont été effectuées pour mesurer l'apport d' O_2 de trois systèmes à fines bulles (tableau 3-I 1). Les systèmes ont été perfectionnés depuis lors - surtout les aérateurs couvrant tout le fond du bassin -, mais les valeurs sont tout aussi élevées pour les modèles les plus récents, qu'il s'agisse des dômes d'aération ou des aérateurs à plaques.

Volume du bassin à boues activées: 350 m^3

Variante A

Profondeur : largeur = 1 : 4 (bassin peu profond)

→ Puissance électrique minimale pour éviter les dépôts (selon ill. 3-I 0)

spécifique	14	W/m ³
absolue	4.9	kW

Variante B

Profondeur : largeur = 1 : 2,5 (bassin profond)

→ Puissance électrique minimale (selon ill. 3-I 0)

spécifique	29	W/m ³
absolue	10	kW

Remplacer au plus vite les aérateurs à air comprimé à moyennes et grosses bulles, qui consomment deux fois plus d'énergie que les modèles à-fines bulles.

Exemple en relation avec l'illustration 3-10

Variante A: bassin peu profond, variante B: bassin profond

	Apport d'oxygène (en kg O ₂ /kWh)			
	Eaux propres		Boues	
	bon	moyen	bon	moyen
Aérateur à air comprimé				
Aérateur à répartition en bandes	2.2	1.7	1.3	1.0
Aérateur couvrant le fond du bassin	3.2	2.4	1.9	1.4
Aérateur à plaques	3.9	2.9	2.3	1.8

Tableau 3-I 1
Apport d'oxygène par les aérateurs à air comprimé [34]

Aérateurs à répartition en bandes (illustration 3-I 2)
Le système d'aération est constitué de tubes ou de dômes poreux disposés le long d'une ou des deux parois longitudinales. De par la forte poussée verticale, ce modèle permet un bon brassage, mais les valeurs d'apport d'oxygène sont inférieures à celles que présentent les aérateurs de surface.

Ce système présente toutefois un inconvénient si le débit d'air est trop faible, car le brassage est alors insuffisant et les boues se déposent.

Ces trois systèmes font l'objet de descriptions très détaillées dans les ouvrages cités sous [34] et [26].

Aérateurs couvrant tout le fond du bassin (illustration 3-I 3)
Les éléments d'aération (tubes, dômes, etc.) sont répartis sur tout le fond du bassin. La puissance requise pour en brasser le contenu étant d'environ 20 W/m³, des dépôts ont tendance à se former lorsque le besoin d'oxygène est faible.

Les valeurs d'apport d'oxygène sont plus élevées que dans le cas ci-dessus, car les bulles d'air séjournent plus longtemps dans l'eau.

Aérateurs à plaques (feuilles) (illustration 3-14)
Les plaques, constituées de feuilles finement trouées, sont réparties sur tout ou partie du fond du bassin. Les bulles d'air, très petites, sont diffusées uniformément, si bien que les valeurs d'apport sont bonnes.

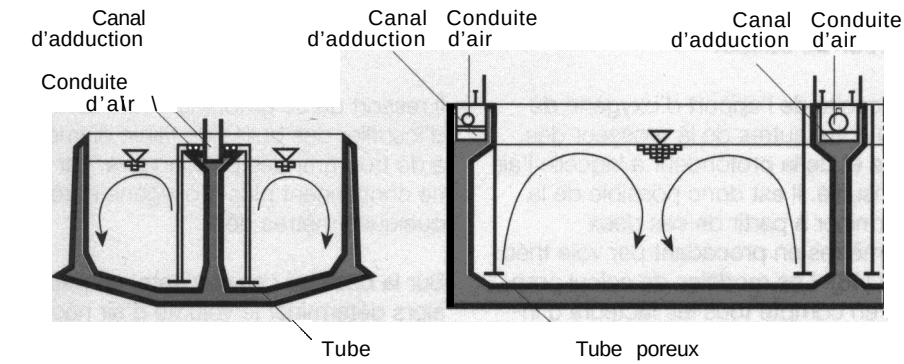


Illustration 3-I 2
Aérateur à répartition en bandes [34]

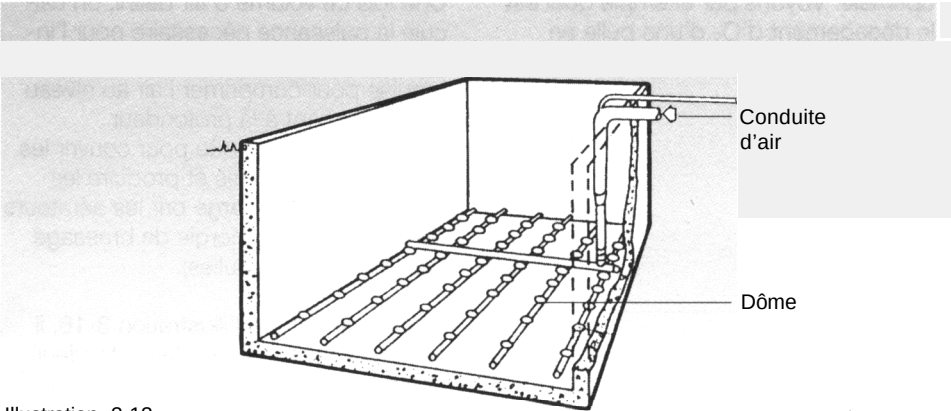


Illustration 3-13
Aérateur couvrant tout le fond du bassin [34]

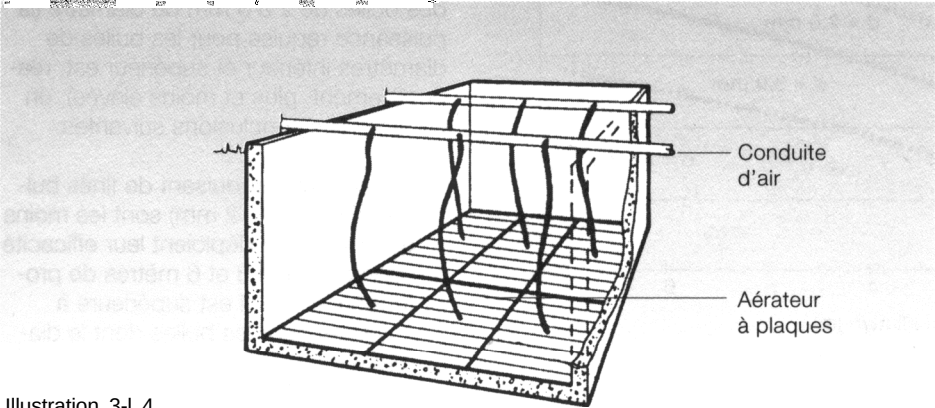


Illustration 3-I 4
Aérateur à plaques [34]

3.5.3
Les systèmes d'apport d'air:
choix et optimisation

Les valeurs d'apport d'O2 relevées pour
les différents systèmes d'aération don-
nent une première indication quant à la
consommation d'électricité. Mais
d'autres facteurs ont une influence sur la
puissance de production des aérateurs.

Apport d'O2 en fonction de la pro-
fondeur du bassin

L'efficacité de l'apport d'oxygène dé-
pend entre autres de la grosseur des
bulles et de la profondeur à laquelle l'air
est insufflé. Il est donc possible de la
déterminer à partir de ces deux
paramètres en procédant par voie théo-
rique [48]. Les modèles de calcul pren-
nent en compte tous les facteurs d'in-
fluence connus, tels que la vitesse
ascensionnelle des bulles, la solubilité
de l'oxygène selon la profondeur
d'insufflation, la coalescence des bulles,
etc., et permettent de trouver la solution
optimale. Voyons par exemple quel est
le dégagement d'O2 d'une bulle en
fonction de son diamètre:

Il ressort de ce graphique qu'il est inutile
d'insuffler des bulles de faible diamètre
à de trop grandes profondeurs, car elles
ne contiennent plus d'oxygène après
quelques mètres déjà.

Sur la base de ces résultats, on peut
alors déterminer le volume d'air néces-
saire selon le diamètre des bulles et la
profondeur du bassin (pour une gran-
deur de bassin, un système d'aération,
etc., donnés).

Une fois ce volume d'air défini, on cal-
cule la puissance nécessaire pour l'in-
suffler en mesurant la quantité d'énergie
requisse pour comprimer l'air au niveau
correspondant à la profondeur
d'insufflation, ainsi que pour couvrir les
pertes des conduites et produire les
bulles (perte de charge par les aérateurs
sous pression et énergie de brassage
pour produire les bulles).

Comme le montre l'illustration 3-l 6, il
est possible de calculer la profondeur
optimale d'insufflation pour des bulles
de différents diamètres. La perte de
charge de 0,8 m WS étant donnée pour
des bulles de 2 à 3 mm de diamètre (la
puissance requise pour les bulles de
diamètres inférieur et supérieur est, res-
pectivement, plus et moins élevée), on
peut tirer les conclusions suivantes:

- les systèmes produisant de fines bul-
les (diamètre: ≤ 2 mm) sont les moins
gourmands et déploient leur efficacité
optimale entre 3 et 6 mètres de pro-
fondeur (celle-ci est supérieure à
7 mètres pour les bulles dont le dia-
mètre est ≥ 3 mm);

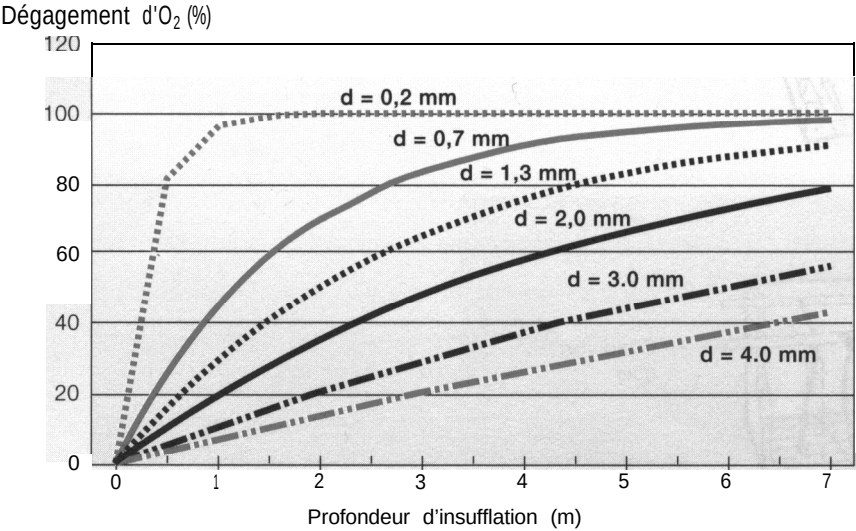


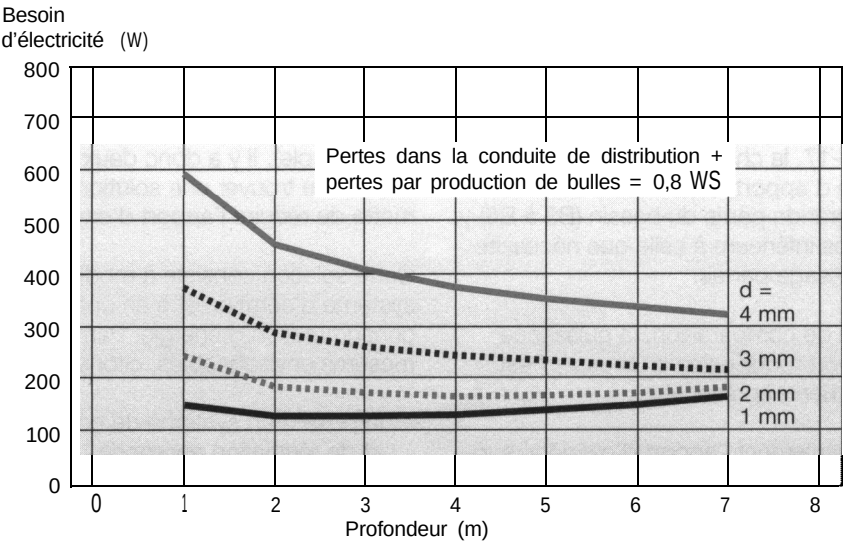
Illustration 3-l 5
Transport d'oxygène en fonction de la profondeur d'insufflation pour des bulles de différents
diamètres (d)

Brassage du contenu du bassin

- les systèmes produisant des bulles de 2 à 3 mm de diamètre permettent, en théorie, d'obtenir un apport d'oxygène maximal de 5 kg O₂ par kWh d'électricité (en conditions standard);
- la profondeur du bassin n'a que peu d'influence sur la valeur d'apport - pour ce qui est des systèmes d'apport d'air -, puisque les courbes obtenues pour les bulles de 2 à 3 mm de diamètre sont quasiment plates.

Du point de vue énergétique, l'insufflation d'air pour brasser le contenu d'un bassin est tout sauf recommandée. La puissance nécessaire pour éviter les dépôts est d'environ 8 Watt par m³, alors que les systèmes de brassage optimisés requièrent une puissance spécifique inférieure à 2 Watt par m³.

Sélon les cas, la puissance d'apport du système d'aération est déterminée non pas par la demande d'oxygène des boues activées, mais par le brassage, si bien que - particulièrement en bout de bassin et lorsque la charge est basse - l'apport d'oxygène nécessaire est si faible que la puissance d'apport est dictée par la puissance minimale de brassage.



Pour une consommation d'électricité minimale, utiliser des aérateurs à air comprimé à fines bulles insufflées à une profondeur de 3à6m.

Illustration 3-I 6
Puissance spécifique nécessaire à l'apport d'1 kg O₂ pour différents diamètres de bulles et différentes profondeurs de bassin

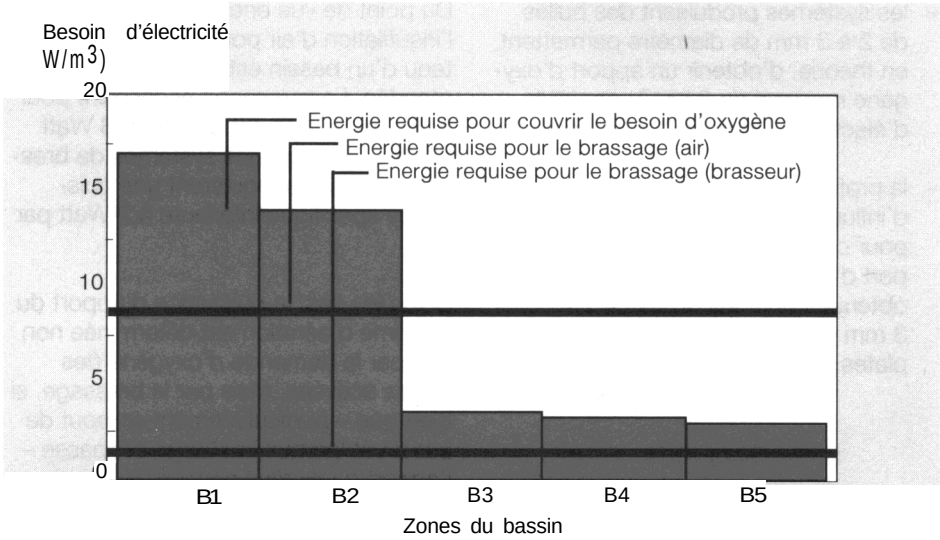


Illustration 3-I 7
Besoin spécifique d'électricité par m³ de bassin subdivisé en cinq zones B1 à B5 (coupe longitudinale)

Choisir le système d'aération en fonction de l'apport d'oxygène d'une part, et du brassage d'autre part. Opter de préférence pour un système équipé d'un dispositif de brassage.

Dans l'exemple reproduit à l'illustration 3-I 7, la charge est basse. La puissance d'apport requise pour aérer la plus grande partie du bassin (B3 à B5) y est très inférieure à celle que nécessite le brassage par air.

A titre de comparaison, la puissance d'apport requise par un brasseur est également représentée.

Non seulement l'apport d'oxygène supplémentaire requis pour le brassage accroît inutilement la consommation d'électricité, mais la concentration d'oxygène, plus élevée, peut, selon la configuration de l'installation, entraver le bon déroulement de la phase

d'épuration en cours (la dénitrification, par exemple). Il y a donc deux bonnes raisons de trouver une solution qui permette de réduire l'apport d'oxygène.

Cette solution consiste à modifier le système d'aération et à en optimiser la consommation d'énergie. Parmi les mesures envisageables, citons:

- la pose d'un système de commande et de régulation approprié,
- l'installation d'un système de brassage indépendant du système d'aération.

3.5.4 La production d'air comprimé

La majorité de l'électricité consommée par un système d'aération est utilisée pour comprimer l'air de procédé. Le dimensionnement des soufflantes joue donc un rôle primordial et doit être conçu en fonction de la profondeur d'insufflation (pression d'alimentation) et de l'apport d'air requis (fourchette), leur rendement devant être optimal en tout point du bassin. Leur mode de fonctionnement (piston rotatif, turbocompresseur, etc.), la profondeur du bassin et le système d'apport entrent également en ligne de compte lorsqu'on procède à une analyse énergétique.

3.5.5 Régulation de l'apport d'oxygène

Principe

L'apport d'oxygène doit être constamment adapté au volume d'eaux usées entrant dans le bassin. Il faut donc installer les systèmes d'aération en conséquence (une opération fondée sur des calculs), mais également s'assurer, par le biais de mesures de régulation, que l'apport d'oxygène est parfaitement adapté au besoin effectif.

Le choix du système de régulation dépend essentiellement du régime de mélange auquel le réacteur est soumis :

- Réacteur à mélange intégral idéal :

Exemple:
bassin rectangulaire avec aérateur de surface

Caractéristiques:
répartition uniforme de la concentration d'oxygène grâce à un brassage intensif et, par conséquent, quasiment pas de temps mort (= temps nécessaire jusqu'à ce qu'on observe, à la sortie, une modification importante de la valeur du réglage à l'entrée)

- Réacteur en cascades :

Exemple:
plusieurs bassins disposés l'un derrière l'autre, à mélange optimal

Caractéristiques:
concentration variant d'un bassin à l'autre, temps mort de l'ensemble du système plus long que pour un seul bassin.

- Réacteur à piston (bassin à flux piston)

Exemple:
bassin longitudinal avec alimentation en tête et air comprimé

Caractéristiques:
le temps mort, quasiment égal au temps de séjour moyen des eaux usées dans le bassin, peut durer plusieurs heures, ce qui entrave considérablement le fonctionnement du système: celui-ci peut cependant être amélioré en subdivisant le bassin en plusieurs compartiments.

Le système de régulation agit donc soit :

- dans un seul compartiment par bassin,
- dans plusieurs compartiments par bassin.

Dans le premier cas, la teneur en oxygène est mesurée en un endroit quelconque du bassin et comparée avec la valeur cible; si la différence dépasse un montant donné, l'apport d'oxygène à l'entrée du bassin est modifiée d'autant.

Ce système donne satisfaction lorsque le brassage du bassin est optimal (= temps mort minime).

Lorsque la durée du temps mort augmente, la concentration d'oxygène mesurée n'est plus représentative de la concentration effective de l'ensemble du bassin: selon l'endroit, la valeur obtenue indiquera un apport d'oxygène insuffisant ou trop élevé.

Une solution consiste alors à effectuer une mesure à l'entrée et une autre à la sortie du bassin, et de comparer la valeur moyenne avec la valeur cible. En cas de transformations, cependant, il convient de subdiviser le bassin en plusieurs zones et d'installer un système de régulation dans chacune d'elles. Les dispositifs d'aération des différents compartiments doivent être pourvus d'un système de commande indépendant du système de régulation. Peu coûteuse pour les aérateurs de surface - il suffit que les machines soient entraînées individuellement -, cette solution occasionne par contre des dépenses plus importantes pour les systèmes à air comprimé.

Pour les STEP équipées d'un système de nitrification, le système d'aération peut être optimisé plus encore en couplant la régulation d' O_2 et celle de $N-NH_4$ (illustration 3-I 8).

En pareil cas, la concentration d' O_2 dans le bassin à boues activées doit impérativement atteindre 2 mg/l durant les périodes de forte charge, afin d'assurer la décomposition des micro-organismes [49]. En revanche, lorsque la charge est moyenne à faible et que, partant, la nitrification maximale est moins importante, le système de régulation de $N-NH_4$ fournit la quantité requise de ce dernier et abaisse l'apport d' O_2 en proportion (exemples: $N-NH_4 \leq 0,5 \text{ mg/l} \rightarrow O_2 = 0,5 \text{ mg/l}$ $N-NH_4 >$

Aérateurs de surface

L'apport d'oxygène au moyen d'aérateurs de surface dépend:

- du nombre de machines,
- de la vitesse de rotation,
- de la profondeur d'immersion.

Cette profondeur peut être modifiée par un mécanisme de réglage de la hauteur ou par un seuil de déversement. Dans ce dernier cas, il convient:

- de prévoir le seuil de façon que le niveau d'eau ne varie pas trop fortement en fonction du volume entrant dans le bassin;
- d'assurer un apport d'oxygène suffisamment élevé lorsque la profondeur d'immersion varie;
- de savoir que la puissance de brassage est moins forte lorsque la profondeur diminue;
- de tenir compte du fait que le moteur d'entraînement et le mécanisme sont trop sollicités lorsque la profondeur augmente.

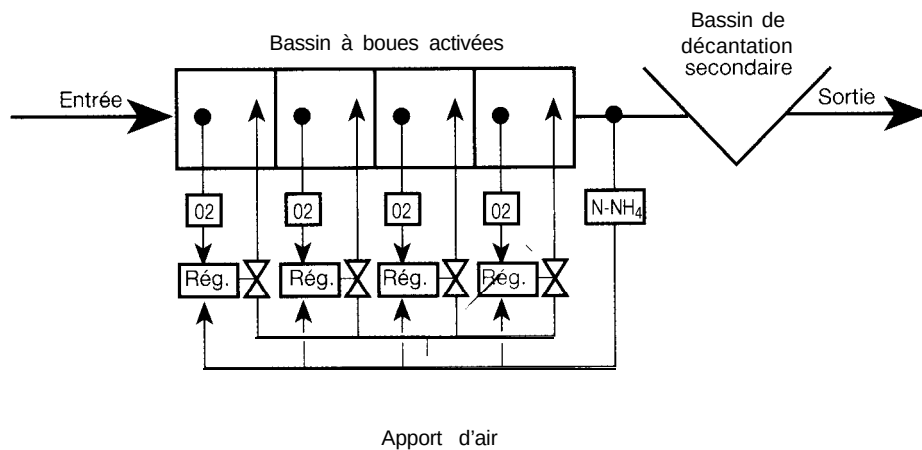


Illustration 3-18
Systèmes de régulation d'O₂ et de N-NH₄: exemple de couplage

Mesure	Plage de réglage des aérateurs de surface	
	Aérateurs rotatifs	Brosses d'aération
Interrupteur	0 / 100%	0 / 100%
Changement de la profondeur d'immersion	50 - 100%	40 - 100%
Réglage de la vitesse de rotation	50- 100%	50 - 100%

Tableau 3-I 9
Plage de réglage pour les aérateurs de surface (en % de la puissance maximale [28])

Aération par air comprimé

Les systèmes à air comprimé sont le plus souvent actionnés par un compresseur à piston rotatif. Le dosage de l'apport d'oxygène est assuré par la régulation du débit volumétrique d'air:

- soit par déclenchement et enclenchement des différentes machines (interrupteur),
- soit par modification de la vitesse de rotation.

Il importe de signaler que, selon le système de régulation de l'entraînement, il est impossible d'abaisser la vitesse de rotation à moins de 40% de la vitesse de rotation nominale. Le changement de vitesse peut être effectué de deux manières: par palier, en utilisant des moteurs à pôles commutables, ou en continu, par un système de régulation de la fréquence.

En règle générale, les différents bassins ou les différentes zones d'un même bassin sont alimentés par un réseau central auquel sont raccordés deux ou plusieurs compresseurs. La régulation des compresseurs et de l'apport d'oxygène est assurée séparément.

La puissance de compression est réglée en fonction de la différence entre les sommes des valeurs cibles et des valeurs mesurées ou, selon la configuration des lieux, en fonction du débit d'air, ou encore de la position des soupapes réglant l'apport d'oxygène.

3.6 La filtration

La filtration est une phase supplémentaire de l'épuration des eaux usées. Introduite à la fin des années septante, elle n'existe encore que dans quelques STEP de Suisse, raison pour laquelle elle ne fait pas l'objet ici d'une description détaillée.

Cependant, comme elle compte parmi les composantes les plus énergivores avec la phase des boues activées, il convient tout de même d'évoquer brièvement les responsables de cette consommation d'énergie et de soulever quelques questions:

- hauteur de relevage des eaux brutes: est-il possible de l'abaisser?
- fréquence de lavage des filtres: est-il possible de réduire le nombre de ces lavages ou la quantité d'eau utilisée?
- adjonction de produits chimiques: est-il possible de réduire la quantité d'agents de floculation et de précipitation?
- pertes de charge par les buselures et les couches filtrantes des filtres à lit profond: est-il possible de diminuer ces pertes en utilisant d'autres matériaux?

Lors de l'évaluation des installations de filtration, il y a donc lieu de déterminer avec précision non seulement les habituels critères comparatifs tels que le taux d'épuration, les coûts, l'exploitation, la sécurité, etc., mais également la consommation d'énergie.

Pour ce faire, il ne suffit bien évidemment pas de s'en remettre aux indications fournies par les fabricants: il faut analyser les conditions d'exploitation réelles.

Déterminer avec précision la consommation requise par les différentes opérations de la filtration, procédé très gourmand.



3.7 Le traitement des boues

3.7.1 Introduction

La consommation d'énergie requise par le traitement des boues est fonction du volume de ces dernières. Il importe donc de retirer le plus vite possible l'eau contenue dans les boues fraîches au moyen d'appareils adaptés aux conditions locales qui soient peu gourmands et qui assurent un bon épaissement primaire statique.

3.7.2 L'épaississement primaire

Lorsque les boues fraîches contiennent peu de matière sèche (MS), il y a lieu, pour des raisons énergétiques, de procéder à un épaissement primaire mécanique. Lorsque la teneur en MS est plus élevée, la dimension des installations utilisées pour la phase suivante (l'hygiénisation) peut être réduite. Enfin, lorsqu'il est possible de maintenir la teneur en MS constante, les réserves de sécurité peuvent être supprimées, ce qui permet d'économiser de l'énergie, aussi bien électrique que thermique.

Pour évaluer la qualité de l'épaississement primaire mécanique, il convient de tester plusieurs modèles, car toutes les machines ne sont pas appropriées à tous les types de boues. Si les résultats de déshydratation sont comparables, il importe d'établir des bilans énergétiques en tenant compte des phases de traitement ultérieures et des agents de floculation utilisés (essais de déshydratation en laboratoire).

Exemple de bilan énergétique

(cf. également tableau 3-20)
Valeurs de la STEP modèle

	Teneur en MS	Volume de boues
Boues fraîches (bassin de décantation primaire)	4%	55 m³/d
Epaississement statique (épaississeur)	5 %	44 m³/d

Ces boues fraîches sont ensuite épaissies mécaniquement par un filtre à bande ou à tambour

Epaississement mécanique	7%	31 m ³ /d
--------------------------	----	----------------------

A la consommation d'électricité supplémentaire requise par l'épaississement mécanique correspond un abaissement quasi équivalent de la quantité d'électricité consommée au cours des étapes ultérieures, Effet secondaire non négligeable: la dimension des installations d'hygiénisation et de stabilisation peut être réduite de 30%.

3.7.3 L'hygiénisation

L'hygiénisation des boues est une étape obligée pour leur valorisation à des fins agricoles. Cette opération requiert certes de l'énergie électrique et thermique, mais elle permet de réduire, indirectement, le besoin en énergie des phases suivantes du traitement. Cette réduction est difficilement quantifiable, étant donné la complexité des interactions, mais on peut tout de même relever les effets positifs suivants:

- L'hygiénisation décompose, par voie

- thermique, la substance organique contenue dans les boues fraîches, ce qui permet d'écourter le processus de digestion
- > Le volume des digesteurs peut être réduit (besoin de chaleur moins élevé) ou la charge des digesteurs existants augmentée
- Le degré de décomposition de la substance organique durant la phase de digestion est accru
- > Meilleure stabilisation des boues
- > Production de gaz de digestion plus élevée
- Le degré d'épaississement statique

- des boues digérées augmente
- >Charge moins élevée aux étapes suivantes:
- valorisation agricole: moins de transports
- élimination des boues: installations de déshydratation et de séchage moins grandes et matériau à transporter moins volumineux

Pasteurisation

L'hygiénisation en continu plutôt que par charges requiert moins d'énergie électrique et thermique, car les pompes sont moins sollicitées et les pertes de transmission sont plus faibles.

Stabilisation aérobie thermophile/ Fermentation

Lorsque l'installation est soumise à de fortes variations en cours de journée, il peut s'avérer utile de prévoir plusieurs lignes ou plusieurs réservoirs.

Comparée à la pasteurisation, la stabilisation aérobie thermophile consomme nettement plus d'électricité (cf. chap. 2.4.3) et quasiment la même quantité d'énergie thermique. Au cours du processus, le contenu du réacteur dégage de la chaleur (gain de chaleur par réaction exothermique), mais la production de gaz est moins élevée. La comparaison énergétique penche donc en faveur de la pasteurisation, car cette dernière fournit plus de gaz, et celui-ci produit de l'électricité de haute valeur.

BILAN ÉNERGÉTIQUE STEP MODÈLE de 20 000 EH		Epaississement statique uniquement		Epaississement statique et mécanique	
Volume de boues fraîches restant pour les phases ultérieures		44 m³/d (100%)		31 m³/d (70%)	
ÉNERGIE		Electricité (kWh/d)	Chaleur (MJ/d)	Electricité (kWh/d)	Chaleur (MJ/d)
Cons. épaississement mécanique				17	
Hygiénisation		90	400	70	350
Stabilisation		90	3'500	90	2'500
Stockage et valorisation: les deux solutions sont énergétiquement équivalentes, car le volume final de boues est le même					
Total		180	3'900	177	2'850
Différence				- 0	~ 1'000

Tableau 3-20
Comparaison énergétique: épaississement statique et mécanique



3.7.4 La digestion des boues

Brassage des boues

La majorité des digesteurs sont équipés de pompes centrifuges. Lorsque les boues n'ont pas été préalablement hygiénisées, le brassage est combiné avec le chauffage des boues fraîches. Dans le cas contraire, la pompe peut être remplacée par un brasseur installé à l'intérieur du digesteur, ce qui permet d'économiser de l'énergie. Une troisième possibilité consiste à brasser le contenu du digesteur avec du gaz de digestion, mais elle ne présente aucun avantage énergétique.

Exemple:

Contenu du digesteur: 900 m³

Brassage par pompe centrifuge à roue ouverte, quantité pompée par jour: 2 à 4 fois le contenu du digesteur

Consommation d'électricité	150-300 kWh/d
----------------------------	---------------

Brassage au moyen d'un brasseur:

Consommation d'électricité	80-160 kWh/d
----------------------------	--------------

La consommation d'énergie peut donc être réduite de moitié environ avec un brasseur qui, de plus, donne de meilleurs résultats.

Chauffage des boues

Les installations d'hygiénisation sont de plus en plus courantes dans les stations d'épuration, si bien que le chauffage des boues fraîches intervient au cours de cette opération. Les installations thermiques des digesteurs ne sont désormais plus utilisées que comme chauffage de secours.

Les boues sont chauffées par un échangeur de chaleur externe (double tuyau) ou interne (brasseur).

Tableau 3-22
Influence du taux de déshydratation des boues sur le volume à transporter et sur la capacité de stockage (utilisation du stockeur existant)

	Teneur en matière sèche	Volume transporté	Capacité de stockage
Base de départ: boues fraîches	6% MS	100%	100%
Déshydratation jusqu'à (base de comparaison)	25% MS	24%	420%
Comparaison avec un taux de déshydratation			
- plus faible	20% MS	30%	333%
- plus élevé	30% MS	20%	500%
- plus élevé	35% MS	17%	580%

Tableau 3-23
Influence du taux de déshydratation des boues sur la consommation de chaleur requise pour sécher les boues

	Boues fraîches déshydratées	Consommation d'énergie thermique pour le séchage des boues (90% MS)
Base de comparaison: boues fraîches	25% MS	100%
Comparaison avec un taux de déshydratation		
- plus faible	20% MS	134%
- plus élevé	30% MS	77%
- plus élevé	35% MS	61%

Tableau 3-24
Influence du taux de déshydratation des boues sur leur pouvoir calorifique [35], part de MS organique: 50%

	Boues fraîches déshydratées	Pouvoir calorifique des boues déshydratées	Comparaison
Base de comparaison: boues fraîches	25% TS	0.66 MJ/kg	100%
Comparaison avec un taux de déshydratation			
- plus faible	20% MS	0.19 MJ/kg	22%
- plus élevé	30% MS	1.54 MJ/kg	179%
- plus élevé	35% MS	2.22 MJ/kg	258%

3.7.5

La déshydratation des boues

Cette opération a pour but de réduire le volume des boues conformément aux exigences requises pour leur élimination.

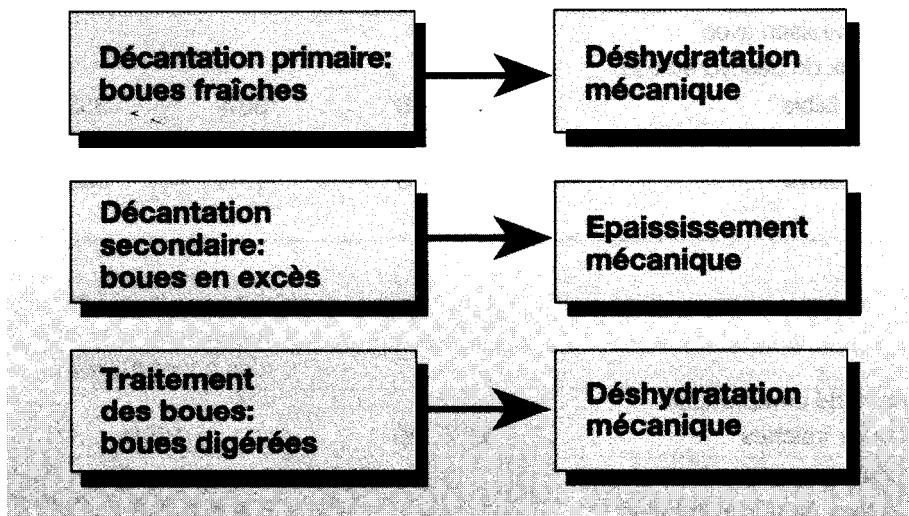


Illustration 3-21

Phases au cours desquelles le volume des boues peut être réduit par voie mécanique

Conséquences de la déshydratation des boues

- Accroissement de la capacité de stockage: en réduisant le volume des boues, le volume de stockage est mieux utilisé (tableau 3-22).
- Réduction du nombre de transports: le volume des boues à éliminer (séchage, incinération, mise en décharge) diminue (tableau 3-22).
- Économie d'énergie au cours des phases ultérieures: à la réduction du nombre de transports s'ajoute une économie d'énergie lors des étapes suivantes (séchage et incinération), puisque que le degré de déshydratation est plus élevé (tableaux 3-23 et 3-24).
- Augmentation du pouvoir calorifique des boues avec l'accroissement de leur teneur en MS, puisque la quantité d'eau chauffée et vaporisée pendant l'incinération est moindre (tableau 3-24).

Capacité d'épaississement/ de déshydratation des boues selon leur capacité hydrophile	% d'épaississement (statique, sans conditionnement)		Limites de déshydratation avec					
			filtre-presses à bandes ¹⁾ centrifugeuses agents de floculation: polymères ou sels métalliques		filtres à pression (filtre-presses, p. ex.) polymères ou sels métalliques			
					sans chaux/additifs		avec chaux/additifs	
	MS (%)	TE (%)	MS (%)	TE (%)	MS (%)	TE (%)	MS (%)	TE (%)
bonne	>7	< 93	> 30	< 70	> 40	< 60	> 45	< 55
moyenne	4 - 7	96 - 93	22 - 30	78 - 70	22 - 40	78 - 60	30 - 45	70 - 55
mauvaise	<4	> 96	< 22	> 78	–	–	30 - 35 ²⁾	70 - 65 ²⁾
TE = teneur en eau 1) Concentration à l'entrée: 3% < MS < 9% 2) avec apport élevé de chaux ou d'additifs uniquement Source: document de travail de l'ATV/VKS - Fachausschusses 3.2: Maschinelle Schlammmentwässerung								

Tableau 3-26
Limites d'épaississement et de déshydratation des boues [36]

- Réglage des machines

Chaque système doit être réglé et optimisé en fonction des conditions spécifiques à l'installation:

centrifugeuse:
– vitesse de rotation

filtre à bandes:
– effort de poussée des cylindres
– vitesse des bandes
– alimentation uniforme sur bande

- Choix de l'agent de floculation

Il existe une multitude d'agents de floculation. Il s'agit de choisir le produit convenant le mieux au type de boues à traiter, en procédant à des essais.

Épaississement mécanique des boues en excès

L'épaississement mécanique des boues en excès est utilisé essentiellement lorsque leur taux de sédimentation est mauvais. L'opération s'effectue au moyen de tamis (à tambour ou à bande) et de décanteurs centrifuges. Les boues en excès sont épaissies de 0,5-0,8% MS à 6-8% MS.

Le tamisage requiert l'apport d'agents de floculation. Pour un même résultat, la centrifugation consomme deux fois plus d'électricité (tableau 3-25).

	Décanteur centrifuge	Tamis
Consommation d'électricité	100 - 200 kWh/t MS	80 - 120 kWh/t MS
Agents de floculation		3 - 8 kg/t TS
Encombrement	plus faible	plus grand
Investissement (machines)	plus élevé	plus faible

Tableau 3-25
Épaississement mécanique des boues en excès:
tableau comparatif

Le choix du procédé dépend certes des conditions locales, mais la consommation d'énergie est un facteur important à ne négliger sous aucun prétexte.

Déshydratation mécanique des boues

- Choix du système

Les systèmes existants sont décrits au chapitre 2.45. Le choix dépend avant tout des conditions locales et de l'élimination prévue pour les boues. Selon le système, mais également selon les ca-

ractéristiques des boues, le taux de déshydratation est plus ou moins élevé. La solution permettant d'atteindre le meilleur taux n'est pas obligatoirement la meilleure. Il peut arriver, par exemple, que le taux optimal soit imposé par l'installation de séchage existante.

Les limites approximatives d'épaississement et de déshydratation possibles sont indiquées au tableau 3-26 [36]. A la comparaison théorique des systèmes devraient s'ajouter des séries d'essais sur place avec des unités de déshydratation mobiles.

La meilleure solution pour déshydrater les boues? Celle qui consomme le moins d'énergie possible.

3.8 L'infrastructure

3.8.1

L'eau potable et l'eau industrielle

- usage modéré;
- remplacement, autant que possible, par de l'eau industrielle (pour laver, refroidir, nettoyer);
- eau chaude, voir le chapitre 5.35.

Eau industrielle

Mesures d'économie d'énergie:

- usage modéré;
- remplacement de l'eau industrielle par de l'eau usée épurée en cas d'alimentation par les eaux souterraines;
- installation de récipients à air comprimé munis de commandes de pompage pour compenser les variations de charge; élimination des soupapes de surpression permanentes, extrêmement gourmandes;
- répartition de l'eau industrielle sur deux réseaux dans les grandes installations: un réseau à basse pression (3 à 4 bars) pour l'eau de lavage et un réseau à pression plus élevée (6 à 10 bars) pour le nettoyage des bassins et des places d'accès.

3.8.2

L'air comprimé

Production d'air comprimé

On distingue deux groupes principaux de producteurs d'air comprimé: les turbomachines et les compresseurs. Les premières fonctionnent selon le principe de la compression dynamique, les seconds selon le principe du refoulement.

Turbomachines

Les turbomachines (ventilateurs) sont utilisées pour les installations de ventilation, d'épuration des effluents gazeux et de chauffage de l'air. Le rendement des ventilateurs, qui varie fortement, peut être optimisé en fonction de plusieurs paramètres (type, grandeur, produit), ce qui se justifie surtout quand la durée d'exploitation est longue (cf. chap. 3.8.3).

Domaine d'utilisation:

- grand volume d'air
- basse pression (de l'ordre du mbar)

Compresseurs

On distingue:

- les compresseurs à piston rotatif, utilisés pour l'aération sous pression des bassins à boues activées et, en plus petites unités, pour l'aération des dessableurs;

domaine d'utilisation:

- volume d'air jusqu'à 300 Nm³ min,
- pression moyenne (de 0,1 à 1 bar)
- les compresseurs à anneaux liquides, utilisés pour le brassage du digesteur au moyen d'une pompe à injection de gaz;

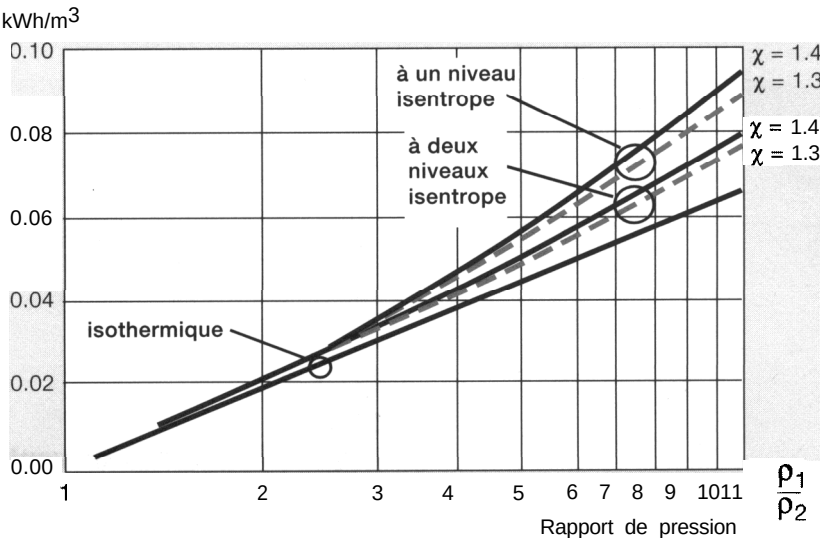


Illustration 3-27
Consommation spécifique théorique d'électricité requise par la compression (p1 et p2 en bars de pression absolue)

domaine d'utilisation:
pression jusqu'à 2 bars

- les compresseurs à piston et à vis, utilisés pour fournir l'air comprimé aux entraînements pneumatiques, aux machines d'ateliers, etc.);

domaine d'utilisation:
pression de 6 à 10 bars

pression (> 6 bars) consomme moins d'électricité qu'une installation à un niveau pour effectuer le même travail. Lors de la comparaison énergétique, il faut également prendre en compte la consommation des dispositifs annexes, tels que ventilateurs et pompes de refroidissement.

Énergie

L'évaluation énergétique d'un système de compression repose sur plusieurs paramètres dont les interactions sont très complexes:

- le dimensionnement et la forme, les performances,
- le rendement volumétrique,
- le rapport de pression p2/p1 (pression distribuée/pression d'aspiration),
- les changements de température dus à la compression,
- le nombre de niveaux de pression,
- la teneur en humidité de l'air.

La demande d'énergie requise par la compression est présentée par l'illustration 3-27 (ordre de grandeur). Le rendement isotherme (température constante) et le rendement isentrope (entropie constante) d'une machine peuvent être calculés à partir de valeurs théoriques. Sachant qu'ils varient fortement en fonction des paramètres ci-dessus, il convient, avant d'opter pour l'une ou l'autre machine, de comparer plusieurs modèles. A titre d'exemple, une installation bien dimensionnée à deux niveaux de

Fuite dans le réseau Diamètre du trou (mm)	Pertes pour une pression de 6 bars (m³ /h)	Puissance de com- pression supplémentaire (kW)
1	4	0.4
3	40	4
5	110	11
10	450	45

Tableau 3-28
Pertes du réseau d'air comprimé et puissance supplémentaire requise pour les compenser

Distribution de l'air comprimé

L'air comprimé (commandant les dispositifs de réglage hydrauliques) est en règle générale distribué par des réseaux étendus dans des tubes de faible diamètre. Celui-ci ne doit toutefois pas être trop petit, car les pertes de pression sont alors élevées, et doivent être compensées par une puissance supplémentaire. Bien dimensionnés, en revanche, ils accusent des pertes de 0,1 à 0,4 bar seulement entre le producteur et le consommateur.

Les pertes peuvent également survenir lorsque les réseaux ne sont pas étanches. De toutes petites fuites peuvent provoquer des pertes importantes (tableau 3-28) qui entraînent une durée d'exploitation plus longue des compresseurs. Dans les réseaux en bon état, les fuites sont de l'ordre de quelques pourcent seulement.

L'optimisation du rendement des compresseurs et distributeurs d'air a fait l'objet d'une publication RAVEL [38].

3.8.3 L'épuration de l'air de ventilation et de l'air vicié

Les installations de ventilation ont plusieurs fonctions dans une STEP.

Émissions olfactives

Pour éviter les émissions olfactives, les sources d'odeurs sont souvent confinées au moyen de dispositifs de construction. Les locaux dans lesquels le personnel passe ou travaille doivent donc être ventilés. Avant de procéder au confinement, il convient de penser aux problèmes de sécurité (protection du travail, prévention des accidents, protection contre les explosions, etc.) et de les résoudre en tenant compte des aspects d'ordre énergétique.

Par ailleurs, il importe que l'air ventilé soit en sous-pression afin d'éviter tout dégagement d'air pollué à l'extérieur. Le confinement est préférable à une grande installation d'aération, car la consommation d'énergie est nettement moindre.

Émissions sonores

Les locaux insonorisés requièrent un système de ventilation uniquement si le personnel doit y travailler, ou si la température ou l'humidité de l'air sont trop élevées.

Déshumidification

Bon nombre de locaux couverts comportent des plans d'eau dont la vaporisation accroît l'humidité de l'air. Selon les cas (protection des matériaux, par exemple), cette humidité doit être évacuée par ventilation naturelle ou mécanique.

Refroidissement

Dans certains locaux, les soufflantes, les pompes, les installations CCF, etc. dégagent de la chaleur. S'il n'est pas possible de limiter la production de ces rejets ou de les récupérer, il faut alors les éliminer sans consommer d'énergie, à savoir par aération naturelle ou par transmission de chaleur à travers l'enveloppe du local. L'installation d'un système de ventilation ne doit intervenir qu'en dernier ressort.

Installation de systèmes de ventilation peu gourmands: marche à suivre

Lorsqu'un système de ventilation doit être installé ou rénové, il faut tout d'abord adopter une stratégie dont l'objectif premier est de réduire au minimum la quantité d'air, dont le transport, la distribution, la production, le filtrage et le chauffage consomment de l'énergie. De plus, l'air évacué doit être épuré, ce qui requiert également de l'énergie.

Éviter autant que possible les installations de ventilation et d'épuration de l'air vicié.

Voici les étapes de la stratégie à adopter:

- Se procurer tous les renseignements et documents nécessaires: données et plans de l'installation
- Recenser les locaux à ventiler: quels sont-ils? à quoi servent-ils? Données nécessaires: surface, volume, superficie des plans d'eau
- S'assurer qu'ils doivent vraiment être ventilés: odeur, bruit, hygiène et sécurité du travail, température et humidité (valeurs extrêmes)
- Déterminer le débit d'air/le taux de renouvellement nécessaire: réduire le débit au stade du projet de dimensionnement déjà
- Attribuer des degrés d'appréciation aux différents paramètres: odeur: faible/forte humidité: sec/humide température: chaud/froid
- Former des chaînes pour utiliser l'air plusieurs fois: selon les cas, tenter de réutiliser les différents flux d'air ou flux partiels

Exemple:

diriger l'air peu pollué évacué par l'installation de dessablage dans le local des bennes, ce qui permet un renouvellement minimal de l'air ainsi qu'une protection contre le gel des machines.

Une fois ces étapes franchies, le projet d'installation peut démarrer (sans oublier de tenir compte des normes en vigueur en matière de ventilation).

Mesures d'économie d'énergie

- installer des systèmes de récupération de chaleur;
- utiliser des mécanismes d'entraînement à réglages multiples, afin d'adapter le volume d'air au besoin effectif.
- réduire le régime d'exploitation, voire arrêter les machines (en dehors des heures de travail, p. ex.), si cela est possible.

Épuration de l'air vicié

Les installations de ventilation servent également à épurer l'air vicié. Leur puissance et, partant, leur consommation d'énergie, sont déterminées avant tout par les systèmes utilisés au cours des étapes antérieures.

Il convient donc d'adapter les premières aux seconds de façon optimale.

3.9 Tableaux synoptiques des mesures à prendre

Mesures à prendre

– immédiatement: Mi

- à court terme: Mct

- avec d'autres mesures: Ma (cf. chap. 7.3)

Réseau de canalisations et traitement des eaux de pluie

N°	Mesures	voir chapitre
Mal	Déversement/Bassins d'eaux pluviales Réduire les pertes hydrauliques	3.2.1
Ma2	État actuel: Station de relevage placée avant la phase d'épuration mécanique et traitement des eaux de déversement à l'intérieur de la STEP Mesure: Voir s'il est possible d'installer les bassins d'eaux pluviales avant la station de relevage	3.2.1
Ma3	État actuel: Déversement des eaux de pluie à l'intérieur de la STEP, après le bassin de décantation primaire, p. ex. Mesure: Envisager une modification de l'ordonnancement hydraulique Exemple: a) Supprimer le déversement intermédiaire b) Uniformiser le volume maximal d'eau pour toutes les phases d'épuration; exemple: volume maximal d'eaux usées à épurer QTP = (1 +1) QTS c) Les mesures a) et b) mises en œuvre permettent de libérer une certaine capacité hydraulique dans la phase de traitement mécanique Envisager alors la mise hors service de l'un ou l'autre bassin (dessableur, bassin de décantation primaire) d) Étudier la possibilité d'utiliser le/s bassin/s à d'autres fins, par exemple de les transformer en bassins d'eaux pluviales ou en stockeurs de boues	3.2.1
Ma4	Réduire le volume: - d'eaux claires parasites - d'eaux de pluie - d'eaux polluées	3.2.2

Dimensionnement des installations

N°	Mesures	voir chapitre
Mal	Réduire le volume d'eaux usées Q_{TS} , Q_{TP} voir Ma3 du tableau précédent	3.2.1
Ma2	Optimiser les conditions hydrauliques: - aménagement optimal des canaux, caniveaux, etc. - suppression des réserves inutiles lors du dimensionnement - réduction de la longueur des transports	3.2.1
Ma3	Dimensionner les machines en fonction de leur durée d'utilisation	3.2.2

Stations de relevage et de pompage

N°	Mesures	voir chapitre
Mil	Examiner toutes les composantes des stations de relevage et de pompage	3.4.2
Mi2	Système de régulation des pompes Les dispositifs existants sont-ils utilisés?	3.4
MctI	Mise en charge de l'entrée de la station de pompage Vérifier s'il est possible d'immerger la partie inférieure des pompes Adopter la technique MCR et remplacer les mécanismes d'entraînement (évent.)	3.4.2
Mct2	Optimiser le système de régulation des pompes exemple: réglage dépendant de la quantité de boues transportées par la station de pompage des boues en retour	
Mal	Remplacer les vis d'Archimède, ouvertes, par des vis à manteau tubulaire (fermées)	3.4.1
Ma2	Remplacer les pompes à faible rendement par des pompes à rendement plus élevé	3.4.1
Ma3	Installer des pompes adaptées aux différentes charges: charge minimale, charge normale et charge de pointe	3.4 / 3.3.2

Épuration des eaux

No	Mesures	voir chapitre
Mil	Dessableur aéré Optimiser l'apport d'air	2.3.4
Mi2	installation à boues activées Optimiser l'installation existante et adopter la technique MCR: - étalonnage des sondes à oxygène - contrôle de la teneur en oxygène dans les bassins et les zones - analyse du fonctionnement du compresseur	3.5
Mct1	Installations à boues activées Amélioration des installations existantes et adoption de la technique MCR, y compris pour les compresseurs	3.5.5
Mct2	Installations à boues activées avec dénitrification en tête Installer des pompes pour la recirculation interne des nitrates à la sortie des bassins à boues activées	2.3.2
Mct3	Boues en retour Régler la pompe proportionnellement au volume entrant dans les bassins à boues activées	2.3.2
Mct4	Filtration Réduire la fréquence des lavages et la quantité d'eau	3.6
Mal	Installations à boues activées Remplacer le système de compression et d'apport d'air, adopter la technique MCR	3.5
Ma2	Installations à boues activées avec dénitrification en tête (voir aussi chap. 2) Régler la recirculation interne des nitrates en fonction du débit à l'entrée (mesurage on-line de la DCO)	3.5

Traitement des boues

N°	Mesures	voir chapitre
Mi1	Optimiser les systèmes d'enclenchement des différentes machines de déshydratation	3.75
Mi2	Optimiser le dosage des agents de floculation et l'emplacement des dispositifs	3.7.5
Mi3	Optimiser la stabilisation (et l'hygiénisation) des boues Objectif: haute production de gaz	3.7.2
Mct1	Élever le degré d'épaississement primaire statique des boues fraîches à 5-6% MS	3.7.2
Mct2	Élever le degré de déshydratation primaire mécanique des boues fraîches à 6-7% MS (procéder à des essais)	3.7.5
Mct3	Réduire le volume de boues digérées en élevant leur degré de déshydratation à 25-40%	3.7.5
Mct4	Élever le degré de déshydratation mécanique des boues en excès à 5-7% MS Réduire la consommation d'électricité -> Utiliser des tamis Réduire la consommation d'agents de floculation -> Utiliser des centrifugeuses	3.7.5
Ma1	Alimenter l'installation d'hygiénisation en continu plutôt que par charges (Besoin d'énergie thermique plus faible)	3.7.3
Ma2	Recourir à la pasteurisation plutôt qu'à l'hygiénisation (consomme plus d'électricité)	3.7.3
Ma3	Mélanger le contenu du digesteur au moyen de brasseurs installés dans le réservoir plutôt que par pompage (en cas d'hygiénisation)	3.7.4
Ma4	Chauffer les boues en excès à 50-55°C avant de les déshydrater	3.7.5

Infrastructure

N°	Mesures	voir chapitre
Mi1	Vérifier l'installation d'eau industrielle	3.8.1
Mi2	Vérifier les installations d'air comprimé	3.8.2
Mi3	Vérifier les installations de ventilation	3.8.3
Mi4	Établir une stratégie de ventilation	3.8.3
Mct1	Optimiser l'installation d'eau industrielle - éviter les pertes - utiliser de l'eau usée épurée plutôt que de l'eau souterraine ou potable - installer des récipients à air comprimé en lieu et place de soupapes de surpression permanentes	3.8.1
Mct2	Installation d'air comprimé - vérifier le rendement - vérifier l'étanchéité des conduites (fuites -> pertes)	3.8.2
Mal	Rénover l'installation de ventilation selon Mi4	3.8.3



4. Mesures d'économie d'énergie électrique

	pages
4.1 Introduction	100
4.2 Les systèmes d'entraînement	102
4.2.1 Les organes système	102
4.2.2 Le rendement moyen	103
4.2.3 Les moteurs utilisés dans les stations d'épuration	104
4.2.4 Les critères de choix	106
4.2.5 Les moteurs à courant continu	113
4.2.6 Adaptation de la vitesse	114
4.3 Les systèmes de commande et de régulation	118
4.3.1 introduction	118
4.3.2 Détermination de la consommation d'électricité	120
4.3.3 Commande et régulation de l'apport d'oxygène	122
4.3.4 Les systèmes de commande des STEP: conseils pratiques	124
4.3.5 La consommation des systèmes de commande: économies réalisables	126
4.3.6 Réduction de la demande de puissance de pointe	127
4.4 Les autres consommateurs d'électricité: économies réalisables	128
4.4.1 Les vannes et les soupapes	128
4.4.2 Les consommateurs d'électricité dans les bâtiments	128
4.4.3 Éclairage extérieur	129
4.5 Tableaux synoptiques des mesures à prendre	130

4.1 Introduction

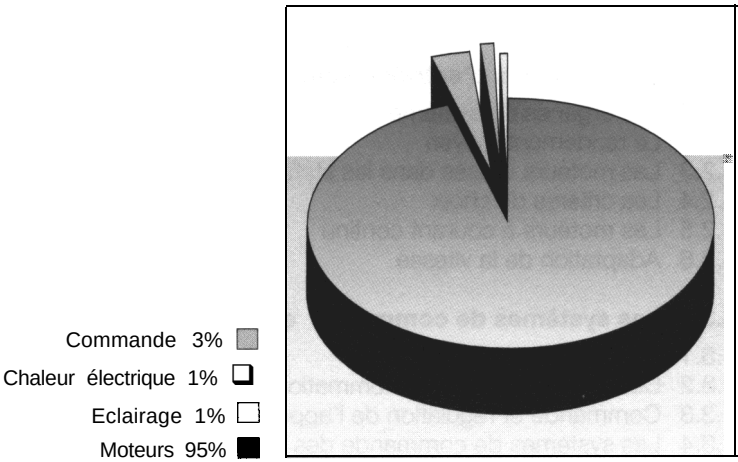


Illustration 4-I
Répartition de la consommation d'électricité d'une STEP moyenne entre ses différents consommateurs

L'analyse des économies d'énergie réalisables dans une STEP fait intervenir conjointement des spécialistes des eaux usées (cf. chap. 2 et 3) et des spécialistes des questions énergétiques. Ces derniers sont appelés à résoudre les problèmes liés à l'énergie thermique et, surtout, à l'énergie électrique (cf. chap. 1).

Le présent chapitre traite uniquement de la réduction du besoin d'énergie électrique possible et, plus précisément, des mesures d'économie d'énergie spécifiques aux stations d'épuration (pour la production, cf. chap. 6). Les personnes désirant de plus amples renseignements sur les systèmes d'entraînement, de commande, de régulation, etc. se référeront à la littérature spécialisée y relative.

L'économie d'énergie électrique en tant que travail (kWh/a) a pour effet secondaire d'abaisser le besoin de puissance maximale, ce qui permet de réduire les dépenses courantes imputables à la fois au prix du travail et à la puissance requise par les différents appareils. Autre facteur aux répercussions intéressantes à l'échelle nationale: le dimensionnement des centrales électriques et des réseaux de distribution peut être réduit, puisque les réserves de puissance sont alors moindres.

Les moteurs d'entraînement (illustration 4-I) sont de très loin les plus gros consommateurs d'électricité requise, essentiellement, par l'installation à boues activées (70% du total). La part des autres consommateurs (chaleur électrique, éclairage, commande, etc.) à la consommation électrique totale est relativement faible.

Lorsqu'on effectue l'analyse d'une STEP existante, il est recommandé de procéder en trois étapes qui, le plus souvent, équivalent à celles que l'on trouvera ultérieurement, au moment de la mise en œuvre proprement dite des mesures (mesures immédiates, mesures à court terme et mesures à prendre avec d'autres, cf. chap. 7).

Examiner avec attention les systèmes d'entraînement des moteurs, auxquels est imputable la quasi-totalité de la consommation d'électricité.

1) Adapter les heures d'exploitation au besoin effectif:

Vérifier et optimiser les programmes des horloges ou des systèmes de commande, puis, au besoin, modifier les réglages (entre le plus souvent dans la catégorie des mesures immédiates).

2) Adapter les prestations énergétiques au besoin effectif:

Examiner et analyser les prestations d'électricité existantes (débit volumétrique, pression, éclairage, p. ex.) et le besoin énergétique effectif, compte tenu des variations possibles, puis, au besoin, installer des capteurs ainsi que des postes de mesure et des régulateurs supplémentaires.

3) Optimiser le rendement des systèmes d'entraînement

L'optimisation énergétique des procédés requiert en général l'installation de nouvelles composantes, voire de nouveaux systèmes d'entraînement. Elle n'intervient donc qu'au moment où ces dispositifs doivent être remplacés ou dans le cadre d'une rénovation énergétique ou générale de la STEP. En pareil cas, il convient d'effectuer des mesurages, puis de procéder à des optimisations globales et de dimensionner très précisément les différents éléments.

Selon qu'elles portent sur tout ou partie d'un procédé, les mesures seront appliquées à l'une ou l'autre ou à toutes les composantes. Il s'agit donc d'analyser chacune d'elles avec attention.

Cette marche à suivre doit également être adoptée par les spécialistes chargés de planifier une nouvelle station d'épuration. Ils devront en effet veiller à optimiser:

1. le besoin en prestations énergétiques;
2. le rendement des systèmes d'entraînement;
- 3) l'ensemble de l'exploitation.

Envisager
une réduction du
besoin avant de
procéder à
l'optimisation des
moteurs.

4.2 Les systèmes d'entraînement

4.2.1 Les organes du système

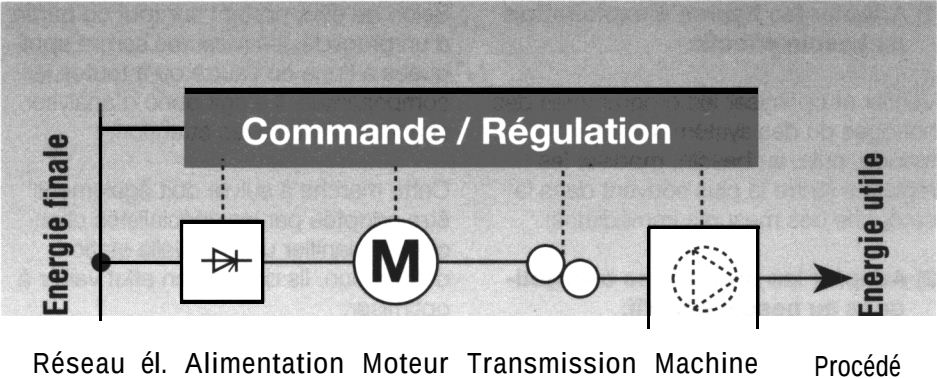


Illustration 4-2
Différents organes d'un système d'entraînement

L'optimisation du système de commande et de régulation permet les économies d'énergie les plus importantes. Il vaut également la peine de réduire la consommation du moteur ainsi que des dispositifs d'alimentation et de transmission. En effet, la consommation d'énergie absolue étant élevée, des abaissements de quelques pour-cent déjà se traduisent par des économies non négligeables qui, dans d'autres domaines, requièrent des dépenses nettement plus importantes.

L'optimisation des processus faisant intervenir un entraînement (réduction du débit à l'entrée de l'installation, par exemple) permet bien évidemment une diminution supplémentaire de la consommation d'énergie.

Avant de remplacer un moteur, il y a lieu de déterminer la prestation énergétique à fournir, d'optimiser le besoin énergétique effectif (cf. chap. 2, 3, etc.), de dé-

nir le nombre d'heures d'exploitation et la puissance du moteur, d'adapter les systèmes de commande et de régulation en conséquence et de prendre en compte tous les organes du système d'entraînement.

Optimiser tous les organes des systèmes et non pas uniquement l'une ou l'autre de leurs composantes.

4.2.2 Le rendement moyen

L'évaluation énergétique d'un moteur repose essentiellement sur le rendement et sur la fraction utile (rendement moyen). Le rendement d'un moteur, grandeur sans unité symbolisée par η , est le rapport entre la puissance nominale délivrée à l'arbre et la puissance nominale fournie par le réseau.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

η rendement
 P_1 puissance fournie par le réseau (puissance finale)
 P_2 puissance délivrée à l'arbre (puissance utile)

Le rendement moyen se rapporte à la consommation d'énergie annuelle et prend en compte les énergies auxiliaires éventuelles (cf. annexe A1.2). Le rendement moyen est également une grandeur sans unité.

$$\eta = \frac{E_2}{E_1}$$

η rendement moyen
 E_1 quantité annuelle d'énergie (éventuelles énergies auxiliaires incluses) fournie par le réseau (énergie finale)
 E_2 quantité annuelle d'énergie délivrée à l'arbre des moteurs (énergie utile)

A partir de la puissance nominale dégagée à l'arbre et des autres données électriques indiquées sur la plaque signalétique d'un moteur, il est possible de calculer la puissance nominale du réseau P_1 requise pour un moteur triphasé au moyen de la formule suivante:

$$P_1 = U_{nom} \times I_{nom} \times \sqrt{3} \times \cos \varphi$$

P_1 puissance nominale
 U_{nom} tension nominale
 I_{nom} intensité nominale
 $\cos \varphi$ facteur de puissance

Il convient toutefois de prendre garde au fait que les indications de la plaque signalétique

- sont des valeurs garanties par le fabricant qui ne correspondent pas obligatoirement aux valeurs effectives: des variations de quelques pourcent sont possibles et des mesurages au banc d'essai ou des données plus précises du fabricant sont nécessaires;
- se réfèrent, pour le rendement, à la puissance nominale uniquement: le rendement dépendant de charges momentanées, si le moteur ne fonctionne pas à la puissance nominale, le rendement réel doit être déterminé par les diagrammes de charges partielles (cf. chapitre 4.2.3).

4.2.3

Les moteurs utilisés dans les stations d'épuration

Les types de moteurs le plus couramment utilisés sont les moteurs asynchrones triphasés («moteur à cage d'écureuil» dont le rendement est la plupart du temps supérieur à 90% et, dans une moindre mesure, les moteurs à courant continu. On ne trouve guère d'autres modèles dans les STEP, si ce n'est les moteurs actionnant les appareils de bureau et de laboratoire, les petites machines d'atelier, etc., dont la consommation est négligeable

Pour une durée de fonctionnement quotidienne moyenne à élevée, le rendement des moteurs asynchrones triphasés est meilleur que celui des moteurs à courant continu et peut encore être accru de quelques pour-cent en version High Efficiency (illustration 4-3). Il convient toutefois de s'assurer, avant d'opter pour ce type de moteur, que la charge effective est proche de la puissance nominale.

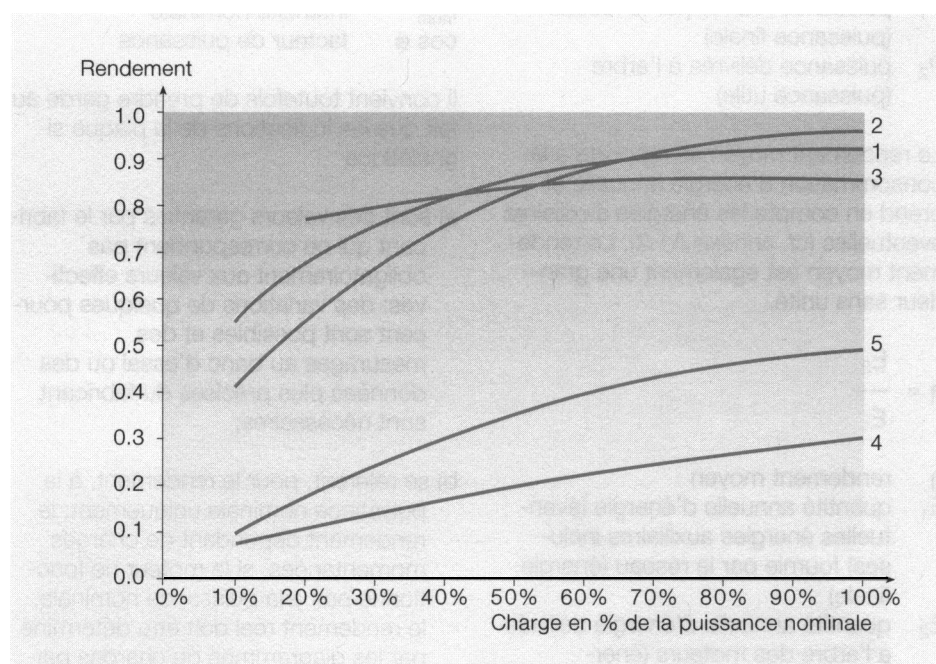


Illustration 4-3

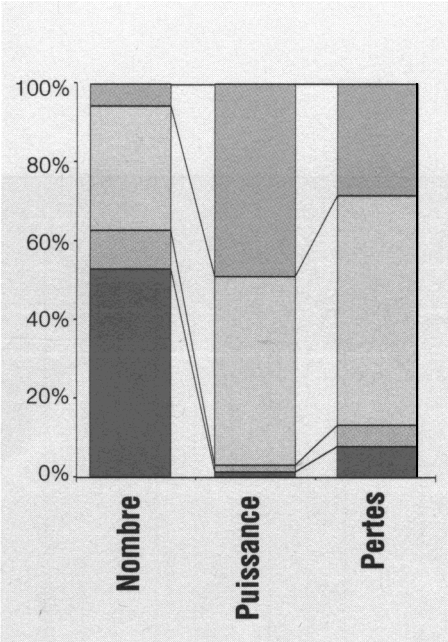
Rendement de différents types de moteurs en fonction de la charge partielle

- 1: moteur asynchrone triphasé, version standard
- 2: moteur asynchrone triphasé, version High Efficiency
- 3: moteur à courant continu
- 4: moteur asynchrone à rotor en court-circuit
- 5: moteur à collecteur

Analyser en priorité
les moteurs les
plus gourmands.

L'illustration 4-3 est le reflet de données antérieures au développement de nouveaux modèles, dont le rendement est désormais meilleur, en charge nominale comme en charge effective.

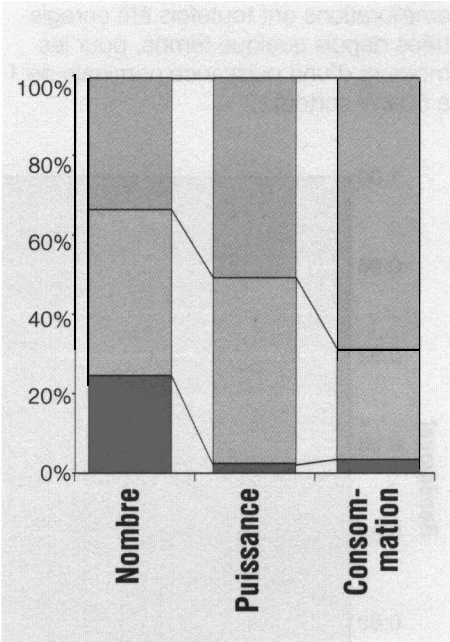
D'une façon générale, quel que soit le type de moteur, le mode d'utilisation est primordial. A titre d'exemple, le rendement d'un moteur asynchrone triphasé, version standard; à 50% de charge partielle est 10% inférieur à celui du même moteur à 75% de charge partielle.



- Puissance: 100 - 500 kW
- Puissance: 10 - 100 kW
- Puissance: 1 - 10 kW
- Puissance: 0 - 1 kW

Illustration 4-4
Répartition des moteurs d'une grande STEP (120 000 EH) et pourcentage de perte par catégorie de puissance

La majorité des moteurs utilisés dans les STEP ont une puissance peu importante et leur part à la consommation d'énergie de tous les moteurs est très faible (illustrations 4-4 et 4-5). Il convient donc d'optimiser en priorité les moteurs à forte puissance. En effet, dans une STEP de 120 000 EH équipées de 210 moteurs, par exemple, plus de la moitié de la consommation totale est imputable aux dix moteurs les plus puissants et les trois quarts aux vingt plus gros.



- Puissance: 2,5 - 5 kW
- Puissance: 1 - 2,5 kW
- Puissance: 0 - 1 kW

Illustration 4-5
Répartition des moteurs d'une petite STEP (1000 EH) et part d'électricité consommée

4.2.4 Les critères de choix

Les moteurs asynchrones triphasés sont les transformateurs d'énergie les plus performants. Toutefois, ils ne déploient leur plein rendement qu'à partir d'une certaine dimension et d'une certaine charge. Exemple: un moteur dont la puissance nominale est de 22 kW et la charge partielle supérieure à 75% aura un rendement d'environ 0,92 (illustration 4-6). Celui-ci sera par contre de 0,78 seulement pour un modèle de plus petite dimension ayant une puissance nominale de 1,5 kW (courant pour les moteurs fabriqués en série). Des améliorations ont toutefois été enregistrées depuis quelque temps, pour les moteurs d'une puissance nominale de 1 à 50 kW surtout.

Mais on trouve encore beaucoup de moteurs aux rendements plus faibles (produits bon marché) et, qui plus est, variable selon le fabricant. Un élément à ne pas perdre de vue au moment du dimensionnement et du choix.

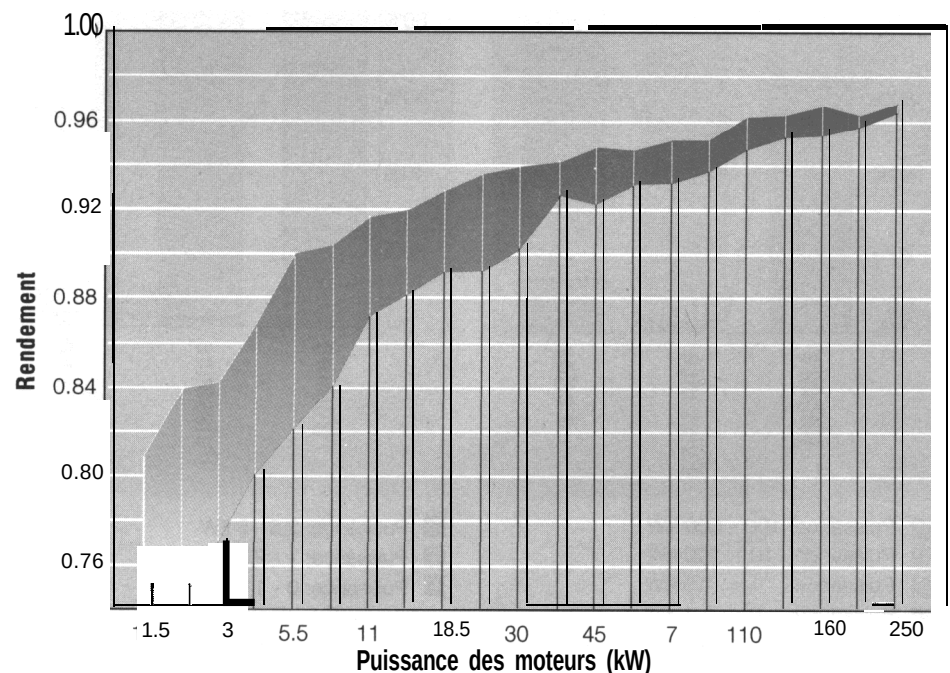


Illustration 4-6
Rendement nominal de moteurs asynchrones triphasés de différentes puissances

Choisir des moteurs dont le système d'entraînement (puissance nominale/taille) soit correctement dimensionné et le rendement élevé.

Pour s'assurer qu'un moteur répond aux critères énergétiques requis, on veillera à déterminer et comparer la consommation d'électricité des différents modèles présélectionnés.

Pour ce qui est de l'évaluation énergétique des moteurs existants, il s'agit d'en mesurer la puissance effective (-> P_1) et d'en déterminer la puissance moyenne absorbée (-> $P_{1,\emptyset}$), pour pouvoir calculer la charge partielle C_p ($C_p = P_{1,\emptyset}/P_{1,N}$)

Quant au rendement nominal, on l'obtient à partir des données inscrites sur la plaque signalétique ou fournies par le fabricant (cf. chap. 4.2.1).

Une fois recensés ces différents éléments, on peut définir le rendement pour une charge partielle η_{ch} (illustration 4-3) puis calculer la valeur moyenne de la puissance moyenne à l'arbre

$P_{2,\emptyset}$ puissance moyenne à l'arbre
 $P_{1,\emptyset}$ puissance moyenne absorbée
 η_{ch} rendement pour une charge effective

Pour évaluer l'économie d'énergie électrique ΔE_1 , on procède de la façon suivante:

$$\Delta E_1 = E_{1,M1} - E_{1,M2}$$

$$\Delta E_1 = \frac{E_2}{\eta_{ch,M1}} - \frac{E_2}{\eta_{ch,M2}}$$

$$\Delta E_1 = \frac{P_{2,\emptyset,M1} \times t_{e,M1}}{\eta_{ch,M1}} - \frac{P_{2,\emptyset,M2} \times t_{e,M2}}{\eta_{ch,M2}}$$

ΔE_1	économie d'énergie électrique en kWh/a
$E_{1,M1} - E_{1,M2}$	absorption d'énergie finale des moteurs 1 et 2 en kWh/a
E_2	énergie utile fournie à l'arbre du moteur en kWh/a
$\eta_{ch,M1}, \eta_{ch,M2}$	rendement des moteurs 1 et 2 (charge effective)
$P_{2,M1} - P_{2,M2}$	puissance mécanique à l'arbre des moteurs 1 et 2 en kW
$t_{e,M1} - t_{e,M2}$	durée d'exploitation des moteurs 1 et 2 en h/a

Le montant des économies connu, il est possible d'estimer quelle somme peut être investie sans porter atteinte à la rentabilité, en prenant en compte l'augmentation du prix de l'énergie (cf. chap. 7). Les exemples ci-après ont pour hypothèses un intérêt de 6%, une durée d'utilisation de 15 ans, le kWh d'électricité à 14 ct et un facteur de correction moyen de 1,5 (annuité = 10,3%).

Optimiser le rendement des moteurs dès la phase de projet, afin d'éviter les dépenses plus importantes qu'entraînerait une transformation ultérieure.

Exemple 1: Soit la pompe à vis d'une station de relevage entraînée par un moteur d'une puissance nominale de 1,1 kW. La vis tourne en continu pour une charge partielle d'environ 70%. La plaque signalétique indique un rendement nominal de 0,72. En remplaçant le moteur par un modèle dont le rendement est de 0,79, on estime (en théorie) à 805 kWh/a la quantité d'électricité économisée pour 8 500 heures d'exploitation par année. Il est possible d'investir 1 650 francs: le remplacement du moteur est donc une mesure rentable.

Exemple 2 : Soit un système d'entraînement d'une puissance nominale de 22 kW et d'une charge nominale de 75% fonctionnant 2 000 heures par année. En utilisant un moteur dont le η_{cp} soit de 92,5% plutôt que de 91,0%, on économise 588 kWh par année, ce qui permet de consacrer 1 200 francs à l'amortissement et au paiement des intérêts occasionnés par l'achat d'un moteur.

Exemple 3: Soit un compresseur entraîné par un moteur asynchrone triphasé de 100 kW fonctionnant en continu avec une charge nominale de 80%. En choisissant un modèle dont le rendement soit de 0,958 plutôt que de 0,947 ($\pm 1,1\%$), on économise environ 9 000 kWh/a. Le prix de l'énergie étant cette fois-ci de 10 ct/kWh (courant à haute tension), l'économie annuelle se monte à 900 francs, ce qui permet d'investir 13 100 francs: compte tenu de l'amortissement, le remplacement du système d'entraînement se justifie même si le moteur existant n'a que quelques années d'utilisation.

Lorsque les moteurs sont sollicités un grand nombre d'heures et que leur puissance nominale, de même que leur consommation d'énergie, sont élevées, il convient:

- d'utiliser des moteurs peu gourmands (attention: en cas de charge partielle < 80%, le rendement peut être inférieur à celui de modèles courants);
- d'envisager le recours à des moteurs spéciaux à haut rendement à partir d'une puissance nominale de 100 kW et de 5 000 heures d'exploitation par année.

A relever que le rendement indiqué par les fournisseurs dans leurs catalogues est établi sur la base de plusieurs critères (valeur garantie par le fabricant, dispersion dans la production, situation du marché, etc.) et qu'il faut exiger que la valeur de garantie soit spécifiée par un contrat prévoyant une clause en cas de non-conformité.

La valeur de garantie doit donc être contrôlée au banc d'essai, en conditions de charge effective et en présence de techniciens compétents.

Dimensionnement

La puissance à l'arbre effective étant connue (P2), il s'agit de déterminer la grandeur du moteur disponible la plus proche. Doivent également être pris en considération les moteurs de puissance supérieure (jusqu'au double de la puissance nominale nécessaire).

De par l'échelonnement de la puissance nominale des moteurs et leur courbe de rendement respective en charge partielle, il est possible d'économiser de l'énergie. La perte absolue de puissance à l'arbre d'un gros moteur peut être plus faible que celle d'un moteur que l'on aurait choisi sur la base d'un dimensionnement classique.

Les courbes tracées sur l'illustration 4-7, représentant le rendement en fonction de la puissance, montrent clairement que le rendement en charge partielle d'un moteur de plus grande puissance peut être plus élevé que le rendement à pleine charge d'un moteur exactement adapté à la puissance.

On s'aperçoit par exemple qu'en utilisant un moteur dont la puissance est de 3 kW plutôt que de 1,5 kW, le rendement augmente de 3 pour cent. En posant pour hypothèse une durée d'exploitation de 8 760 heures par année, l'économie d'énergie atteint 640 kWh/a, ce qui permet un investissement rentable de 1 300 francs (à 14 ct/kWh). A titre de comparaison, le prix d'achat d'un moteur de 1,5 kW est d'environ 750 francs.

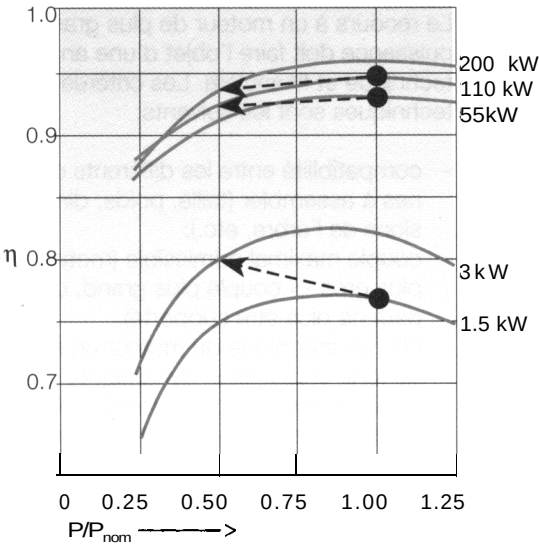


Illustration 4-7
Rendement de quelques moteurs asynchrones triphases en charge partielle. Pour les puissances à l'arbre de 1,5, 55 et 110 kW, le rendement est tracé pour un moteur exactement adapté à la puissance et pour un moteur de puissance nominale deux fois plus élevée.

A l'heure actuelle, le (sur)dimensionnement des systèmes d'entraînement est souvent le résultat d'une démarche sérielle (F) plutôt qu'interactive (J). Pour le ramener à de justes proportions, il convient de tenir compte des conditions requises par le procédé.

Dimensionner un moteur, oui, mais l'optimiser, aussi.

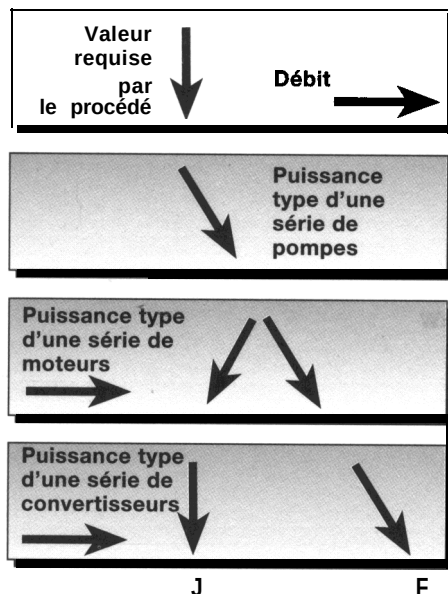


Illustration 4-8
Démarche sérielle, erronée, et démarche interactive, juste, pour le dimensionnement des systèmes d'entraînement.

Le recours à un moteur de plus grande puissance doit faire l'objet d'une analyse technique et financière. Les critères techniques sont les suivants:

- compatibilité entre les différents organes à assembler (taille, poids, dimensions de l'arbre, etc.);
- couple maximal admissible (moteur plus gros -> couple plus grand, qui peut ne plus être supporté);
- charge thermique du moteur en cas de forte exploitation dynamique;
- capacité du réseau d'alimentation suffisante, compte tenu du courant de démarrage, des appareils de protection et d'enclenchement, de la compensation de l'énergie réactive, etc.

Pour ce qui est de l'analyse de rentabilité, il ne faut pas perdre de vue que:

- le prix d'achat sera plus élevé;
- l'installation coûtera plus cher (section des lignes électriques, etc.);
- le dispositif d'enclenchement sera plus coûteux;
- la consommation d'énergie sera plus importante en cas de démarrage fréquent ou d'exploitation dynamique élevée (grand moment d'inertie);
- les frais d'exploitation (entretien, etc.) seront supérieurs.

Si les moteurs ne sont pas toujours exploités de façon optimale du point de vue énergétique, cela est souvent dû non pas à un mauvais dimensionnement, mais à des caractéristiques liées aux STEP. En effet:

- les circuits hydrauliques occasionnent parfois de fortes variations de charge et le moteur doit être dimensionné en fonction de la charge maximale;
- les STEP ayant une longue durée de vie, elles sont, pendant les premières années en tout cas, surdimensionnées par rapport à la charge effective;
- le couple de la machine à entraîner nécessite un gros moteur dont la puissance nominale n'est pas totalement utilisée.

Lorsque les moteurs fonctionnent souvent en charge partielle, il convient d'envisager les mesures suivantes:

- utilisation de variateurs de fréquence pour réduire la vitesse et la puissance (cf. chap. 4.25);
- mise en place d'un autre système d'entraînement, plus petit, conçu pour l'exploitation en charge partielle (exemple: une petite pompe pour l'exploitation par temps sec, une plus grande pour les charges de pointe);
- remplacement des systèmes d'entraînement surdimensionnés ou de certains organes par des modèles adaptés au besoin de puissance du moment et des quelques années à venir;
- exploitation intermittente (démarrage et arrêt doux, voir plus loin).

Par ailleurs, il s'agit de choisir le moteur (type, marque) ayant le meilleur rendement en fonction de son utilisation, en comparant les modèles proposés par plusieurs fabricants.

Lorsque les STEP sont installées sur de grandes étendues, les pertes de transmission sur le réseau 400 volts peuvent être considérables. Il est cependant possible de les réduire en exploitant les très gros systèmes d'entraînement à une tension nominale plus élevée (660 volts, p. ex.), produite par des transformateurs décentralisés.

Les appareils à démarrage doux

Les moteurs doivent également être dimensionnés en fonction de la charge que requiert l'enclenchement des plus gros d'entre eux; le dispositif de démarrage doit être déterminé en conséquence.

Les appareils à démarrage doux sont pourvus d'un système électronique de régulation de puissance intégré en série. Occasionnant des pertes d'environ 3 watts par ampère, ce dernier doit être ponté après le démarrage doux sur les moteurs à puissance élevée. Il permet d'éviter le recours à des systèmes de refroidissement supplémentaires des armoires électriques.

Il existe également des démarreurs progressifs munis d'un module qui contrôle la charge et adapte la tension des moteurs en conséquence. Leur emploi est plus particulièrement recommandé pour les systèmes d'entraînement soumis à de fortes variations de charge de longue durée.

Mode de démarrage	direct	étoile/triangle	progressif
Courant de démarrage	env. 6 - 8 x I _N	env. 3 - 4 x I _N	env. 2-3xI _N

Tableau 4-9
Courant de démarrage requis par les moteurs asynchrones triphasés selon leur système de démarrage, exprimé comme multiplicateur du courant nominal du moteur I_{nom}

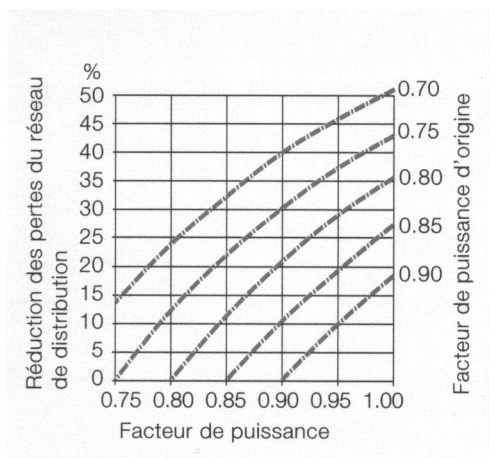


Illustration 4-10

Réduction des pertes d'énergie dans le réseau de distribution par compensation des facteurs de puissance

Le courant nominal des moteurs à démarrage direct est de 6 à 8 et celui des moteurs à démarrage étoile/triangle de 3 à 4. Lorsque ces moteurs sont munis d'un système de démarrage doux, le courant nominal passe, dans les deux cas, à 2, voire 3 et ce, sans aucune pointe de commutation (phénomène courant avec le système étoile/triangle). De plus, la charge mécanique des éléments entraînés est réduite, car les systèmes à démarrage doux ne provoquent pas d'à-coups.

Ces modèles sont utilisés

- pour les systèmes d'entraînement à enclenchements et déclenchements fréquents,
- pour les réseaux de faible capacité (dans les régions rurales, p. ex.) où l'enclenchement d'un entraînement provoque de fortes baisses de tension,
- lorsqu'il y a risque de dysfonctionnement du réseau (en cas de démarrage étoile/triangle, p. ex.),
- dans les petites STEP où un courant de démarrage élevé requerrait trop de puissance.

A partir d'une puissance nominale de 3 à 5 kW, les moteurs devraient être équipés de systèmes à démarrage doux.

Compensation du courant réactif

L'énergie distribuée par le réseau est composée d'énergie active et d'énergie réactive. Cette dernière, utilisée par les moteurs pour créer un champ magnétique, a des incidences négatives sur la production et la distribution d'énergie électrique. Il est cependant possible de prendre des mesures pour la réduire, car elle dépend essentiellement du type et du mode d'exploitation des machines électriques.

La compensation de l'énergie réactive permet:

- de diminuer les pertes d'énergie du réseau de distribution;
- de réaliser des économies, car la compagnie d'électricité ne facture pas ou que très peu l'énergie réactive.

Il vaut donc quasiment toujours la peine d'installer un système de compensation de la puissance réactive. Pour s'en assurer, il suffit de mesurer $\cos \phi$, qui doit se situer aux environs de 0,9. Le système est rentable à partir de 100 A environ.

Lorsqu'on calcule la puissance d'une installation de compensation, il ne faut pas oublier que les appareils électroniques tels que les variateurs de fréquence, les démarreurs progressifs, etc. fournissent souvent une puissance réactive capacitive et que, ce faisant, ils compensent déjà une partie de la puissance réactive inductive.

4.2.5

Les moteurs à courant continu

Installés à l'époque dans les STEP pour les systèmes d'entraînement à vitesse variable, ces modèles ne sont plus guère utilisés aujourd'hui, car leurs coûts d'entretien sont plus élevés et leur rendement est inférieur à celui des moteurs asynchrones triphasés munis de variateurs de fréquence (illustrations 4-3 et 4-1 2) sauf en cas de faible charge et de fortes variations de charge. De plus, leur rendement moyen est mauvais. Il est donc préférable d'utiliser plusieurs machines de puissances différentes actionnées par des moteurs asynchrones triphasés bien dimensionnés, d'autant plus que les spécificités des moteurs à courant continu (précision de consigne et de réglage, comportement très dynamique, etc.) n'ont quasiment pas de domaine d'application dans les STEP.

Un test comparatif effectué dans le cadre de l'optimisation énergétique d'une STEP ne fait que corroborer ce qui précède: une pompe à vis entraînée par un système à courant continu, puis par un système à courant alternatif monophasé, a nécessité 92 kW dans le premier cas et 83,5 kW dans le second, soit un besoin AP1 de 9% inférieur (pour

un débit de 2 000 m³/h).

Les tests comparatifs de ce type sont très coûteux si l'on veut obtenir des valeurs précises. Outre les incertitudes de mesurage, entrent également en ligne de compte les sécurités de dimensionnement et les tolérances d'exécution. La formule ci-dessous, dans laquelle AP1 = 5,5 kW seulement (6%), permet de se faire une idée proche de la réalité:

Économies d'énergie réalisables par année AE:

$$\begin{aligned} AE &= AP1 \times 8\,760 \text{ h/a} \\ &= 5,5 \text{ kW} \times 8\,760 \text{ h/a} \\ &= 48\,180 \text{ kWh/a} \end{aligned}$$

Le montant des économies annuelles s'élève à 4 820 francs (prix de l'énergie à haute tension: 10 ct/kWh), ce qui permet d'investir 70 200 francs (hypothèses: annuité = 10,03%, facteur de correction moyen pour le renchérissement

Remplacer
les systèmes
d'entraînement de
moteurs à courant
continu par des
systèmes à
variateurs
de fréquence et
moteurs
asynchrones,

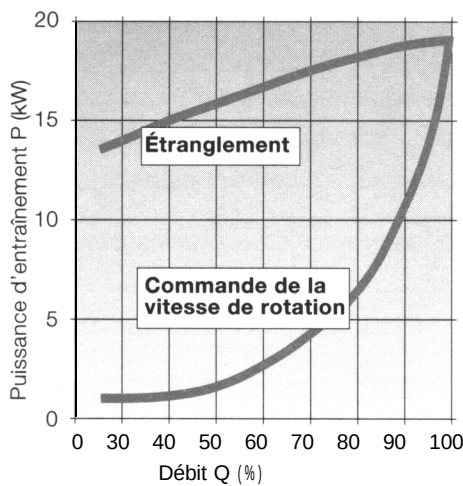


Illustration 4-11

Puissance d'entraînement requise par une pompe en cas d'étranglement et de commande à vitesse réglable

du prix de l'énergie = 1,5).

4.2.6

Adaptation de la vitesse

La majorité des procédés employés dans les STEP sont soumis à de fortes variations de charge, mais ne peuvent pas toujours être exploités de manière intermittente. La puissance utile doit donc être adaptée au besoin effectif. Pour ce faire, les systèmes de commande ou, mieux encore, de régulation de vitesse des entraînements sont préférables aux systèmes de régulation actionnés par des vannes ou des clapets, car ils permettent de réaliser des économies d'énergie plus importantes (illustration 4-11).

L'illustration 4-1 2 présente, à la lumière d'exemples courants, le rendement de quelques systèmes entraînant une pompe centrifuge (plage de réglage de la vitesse de rotation supposée:

$\eta_{\text{nom}} : \eta_{\text{min}} = 3 : 1 = 1500 : 500 \text{ min-l}$), à savoir:

- les variateurs de fréquence actionnés par un moteur asynchrone triphasé,
- les moteurs asynchrones triphasés à pôles commutables pourvus de trois enroulements séparés à vitesse constante (1500/1000/500 min-l),
- les variateurs de vitesse mécaniques ($3 : 1 = 1500 : 500 \text{ min-l}$) actionnés par un moteur asynchrone triphasé à vitesse constante,
- les variateurs à courant continu ($3 : 1 = 1500 : 500 \text{ min-l}$) actionnés par un moteur à courant continu.

D'une façon générale, il convient de préciser que si le rendement nominal diminue lorsque la vitesse de rotation décroît (besoin de puissance d'entraînement), il en va de même des pertes

absolues (fonction de la charge).

Les considérations ci-après en faveur ou au détriment de l'un ou l'autre système s'entendent d'un point de vue énergétique.

Variateurs de fréquence

Lorsque la variation de la vitesse ne peut pas se faire par palier, le système d'entraînement le plus intéressant est le convertisseur de fréquence mû par un moteur asynchrone triphasé (exemple: entraînement pour pompes centrifuges ou pour stations de relevage avec pompes à vis immergées). La conversion de fréquence génère des harmoniques qui perturbent le réseau, mais qui peuvent être résorbées par des filtres.

Moteurs à pôles commutables

Ces modèles sont recommandés - d'un point de vue financier également - lorsque la variation de vitesse peut se faire par palier et que la vitesse de rotation se situe, pendant un laps de temps assez long, entre 500 et 1500 min-l.

Variateurs de vitesse mécanique

Ces systèmes sont à éviter, car leur rendement est très faible. De plus, en cas de pilotage à distance de la vitesse, il faut installer un entraînement supplémentaire, éventuellement muni d'un indicateur de la valeur réelle. De moins en moins utilisés dans les procédés automatisés, on les trouve encore parfois pour des faibles puissances (jusqu'à

Vitesse (min ⁻¹)	Rendement (%)			
	Variateur- de fréquence	Moteur à pôles commutables	Variateurs de vitesse mécaniques	Variateurs à courant continu
1500	0,849	0,85	0,704	0,750
1250	0,840		0,696	0,728
1000	0,801	0,73	0,648	0,625
750	0,700		-*	0,522
500	0,466	0,53	-*	-*
-* = pas de valeur confirmée (charge ≤ 1/8 de la charge nominale)				

Illustration 4-12
Rendement de quelques systèmes d'entraînement à vitesse de rotation variable. Puissance à l'arbre: 7,5 kW, vitesse de rotation maximale: 1500 min⁻¹.

3 kW).
Variateurs à courant continu
Moins intéressants - financièrement aussi - que les variateurs de fréquence, ces entraînements ne sont plus guère utilisés qu'à des fins spécifiques (régulation très précise pour des machines à papier, p. ex.). Les perturbations du réseau dues aux harmoniques sont en revanche moindres.

Exemple

Le besoin de puissance pour entraîner une pompe centrifuge fonctionnant en circuit fermé dépend du débit à la puissance trois et, donc, de la vitesse de rotation. En d'autres termes, si la pompe transporte, à un moment donné, la moitié du débit nominal, le besoin de puissance tombera à 12,5% de la puissance nominale lorsque le variateur de fréquence abaisse la vitesse de rotation de 50%, contre 80% en cas d'étranglement hydraulique au moyen d'une vanne. Économie d'énergie réalisée dans le premier cas: environ 85%.

Ne sont pas prises en compte dans les données ci-dessus les pertes - de l'ordre de 2 à 5% de la puissance d'entraînement -, qui peuvent être atténuées, voire supprimées, en installant des systèmes de dérivation.

Systèmes d'entraînement le plus avantageux: les modèles à courant alternatif monophasé munis d'un variateur de fréquence et actionnant un moteur asynchrone triphasé,

Fonctionnement	Principe de commande	Caractéristiques
Vitesse constante	Démarrage normal Démarrage étoile/triangle	- peu gourmand - système de protection et d'enclenchement simple - en stock (moteurs standard)
Vitesses constantes (deux ou plusieurs dispositifs)	Moteurs à plusieurs enroulements, p.ex circuit de commutation Dahlander (modèles courants, jusqu'à 3 vitesses, avec enroulements séparés)	- peu gourmand, pour autant que la variation de la vitesse puisse se faire par palier
Démarrage doux	- démarreur électronique progressif - démarreur électrolytique - démarreur spécial - démarreur mécanique/hydraulique - démarreur hybride	- réduction de la pointe de démarrage, économies d'énergie secondaires uniquement
Vitesse variable	- variateur de fréquence - convertisseurs de courant	- le moins gourmand de tous les systèmes, pour autant qu'on puisse régler la puissance d'entraînement (vitesse)

Illustration 4-13
Exemples de systèmes d'entraînement et de moteurs

Commandés par des variateurs de fréquence créant des oscillations harmoniques, les moteurs ont un rendement un peu plus faible que s'ils étaient alimentés directement par le courant du réseau. En revanche, en dépit des pertes de divers ordres – dont il convient de tenir compte lors de l'évaluation énergétique –, le rendement de l'ensemble du système d'entraînement alimenté par un variateur de fréquence est meilleur, en charge partielle, qu'en utilisant le courant du réseau, car la régulation de la vitesse de rotation permet une adaptation optimale au besoin de puissance requis.

Pour ce qui est du dimensionnement, entrent également en ligne de compte:

- la forme du moteur,
- le système de protection (contre les explosions, résistance à l'eau, etc.),
- le mode de transmission du moteur aux différents organes,
- la fréquence d'enclenchement,
- etc.

A première vue, ces différents éléments n'ont pas d'incidence énergétique directe. Pourtant, les moteurs munis d'un système de protection contre les explosions, par exemple, ont un rendement inférieur, de par le plus grand espace entre le stator et le rotor, la température superficielle plus faible, le nombre d'enclenchements moins élevé, etc.



4,3 Les systèmes de commande et de régulation

4.3.1

Introduction

Pour que les systèmes de commande et de régulation soient adaptés au besoin, il convient de déterminer ce dernier avec suffisamment de précision aussi bien dans le temps que pour les différents consommateurs d'énergie. Une opération qui repose le plus souvent sur le mesurage de grandeurs physiques (niveau, débit, O₂ température, etc.). La quasi-totalité des STEP sont équipées aujourd'hui des appareils nécessaires à ce type de mesurages.

Une fois ces mesurages effectués, on choisira l'une ou l'autre des stratégies, selon l'élément concerné (moteur, vanne, soupape, etc.).

Optimisés, systèmes de commande et de régulation permettent de réaliser des économies d'énergie importantes, car les différents organes de ces systèmes, moteurs inclus, ont souvent été dimensionnés pour des charges bien plus élevées que celles qu'ils reçoivent effectivement. Il vaut donc la peine d'envisager la possibilité de munir les entraînements de systèmes de régulation (cf. 4.2.6) même si cela peut nécessiter la pose d'appareils de mesure spécifiques

Commande ou régulation?

Dans le cadre d'une optimisation énergétique - qu'il s'agisse d'une construction nouvelle ou d'une rénovation -, il faut se demander, pour chaque élément, s'il doit être actionné par un système de commande ou de régulation. Prenons l'exemple du chauffage d'un local.

Commande

- Le principe consiste à tabler sur le rapport constant entre une grandeur variable, la quantité d'eau chaude modifiable par une soupape, et une grandeur cible: la température du local.

La grandeur sur laquelle la commande doit agir (température) n'est ni mesurée ni utilisée comme facteur d'influence.

Les influences perturbatrices extérieures (diffuseur de chaleur dans le local, rayonnement solaire, fréquence d'ouverture des fenêtres, etc.) ne sont pas prises en compte.

La fonction d'une commande n'est pas de maintenir constante une grandeur donnée (température).

Le système de commande peut être actionné par de l'air comprimé (soupapes pneumatiques), de l'électricité (moteurs), une crête déversante, etc.

Tâche principale de la technique de mesurage, de contrôle et de réglage: adapter l'apport d'énergie au besoin.

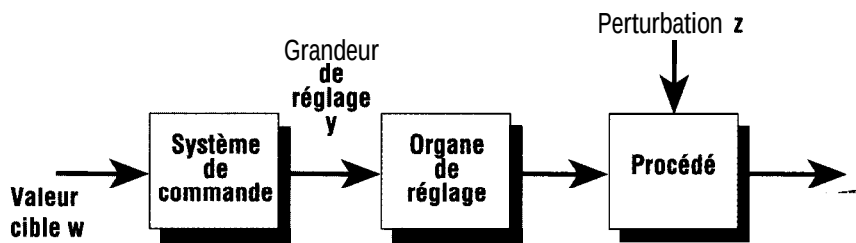


Illustration 4-14
Système de commande

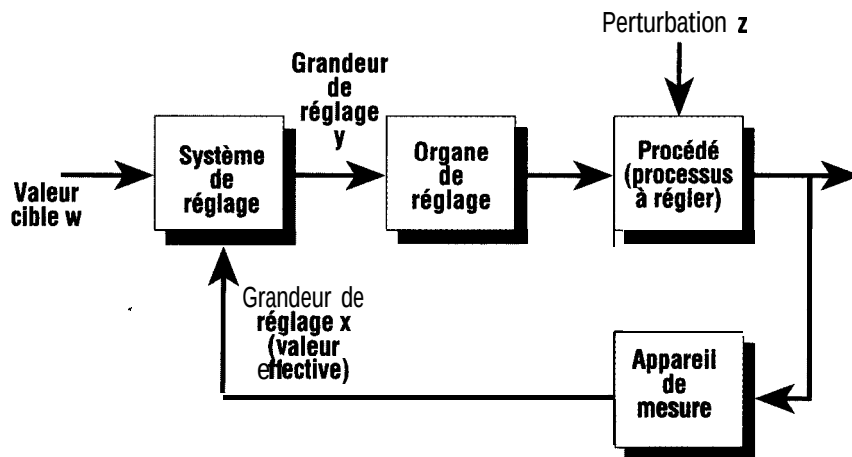


Illustration 4-15
Système de régulation

Régulation

- Le système de régulation n'est pas basé sur un rapport (théorique), mais sur la différence entre la grandeur cible (température) et la valeur mesurée de cette grandeur (température effective), à partir de laquelle le régulateur transmet des signaux de correction sur la soupape d'eau chaude selon un algorithme donné.
- La grandeur cible (température) à maintenir constante est mesurée en permanence.
- Les influences perturbatrices extérieures sont intégrées dans ce mesurage.
- Réintroduite dans le circuit de réglage, la grandeur à mesurer peut provoquer des oscillations si les signaux de correction sont trop forts. Si ces signaux sont trop faibles, en revanche, le circuit de réglage réagit très lentement, et la valeur cible n'est atteinte qu'après un long laps de temps (de même qu'une consommation d'énergie minimale). En pareil cas, le système de commande permet d'obtenir de meilleurs résultats, mais, bien ajusté, le système de régulation est beaucoup plus précis.
- Le système de régulation peut également être actionné de diverses manières, pas obligatoirement électriques

Équiper:

- les procédés dont on connaît bien le fonctionnement et dont les perturbations sont peu importantes d'un système de commande,
- les procédés réagissant diversement selon la grandeur et les paramètres de réglage ou sujets à des perturbations importantes d'un système de réglage.

Utilisation appropriée des systèmes de commande et de régulation par le personnel d'exploitation: une condition sine qua non pour économiser de l'énergie.

Utilisation des systèmes et des installations

Il est donc possible de réaliser des économies d'énergie au niveau des systèmes de commande et de régulation. Mais encore faut-il qu'ils soient utilisés correctement.

- Automatisation ou autres améliorations apportées au système de commande n'ont de raison d'être que si l'exploitant adopte le mode de fonctionnement ad hoc. Il ne sert à rien de calculer avec une infinie précision le volume des boues en retour au moyen d'appareils très coûteux, si ces derniers sont mal entretenus ou actionnés manuellement.
- Les valeurs cibles de la teneur en O_2 sont souvent fixées à un niveau beaucoup trop élevé, dans un souci de sécurité exagéré, ce qui entraîne une consommation supplémentaire importante. Ces valeurs ne devraient pas dépasser 2,0 mg/l.
- Dans nombre de STEP récentes, les composantes existantes se prêteraient parfaitement à une optimisation énergétique, mais les régulateurs sont souvent tellement mal ajustés qu'ils ont un effet nul, voire contraire. Les circuits de réglage qui procèdent d'un calcul mathématique complexe doivent impérativement être actionnés par des appareils adaptables.

4.3.2

Détermination de la consommation d'électricité

Pour fonctionner de façon optimale, les STEP doivent être équipées d'un nombre suffisant d'appareils de mesure, afin que les réserves de sécurité ne soient pas excessives.

Les données relevées par ces appareils permettent:

- de garantir la qualité de l'épuration;
- d'adapter les systèmes de commande et de régulation aux besoins;
- de détecter l'éventuel dysfonctionnement de l'une ou l'autre composante;
- de contrôler la consommation d'énergie (l'entraînement d'une pompe, par exemple, consommera plus si la roue est usée);
- de disposer des bases nécessaires pour procéder à une analyse énergétique sommaire et détaillée.

L'optimisation énergétique repose sur ces relevés, auxquels il convient d'ajouter les données statistiques.

Le besoin énergétique et la consommation effective doivent donc être déterminés pour chaque entraînement. Pour ce faire,

- tous les moteurs dont la consommation d'énergie est supérieure à 1000 kWh/a doivent être pourvus d'un compteur horaire: en comparant le nombre d'heures d'exploitation aux valeurs théoriques et effectives ainsi qu'aux valeurs de la période précédente, le moindre dysfonctionnement du système d'entraînement est décelé immédiatement:

- tous les moteurs assurant le fonctionnement des différents procédés - à l'exception des moteurs auxiliaires de faible puissance - doivent être munis d'un ampèremètre, afin d'estimer, par extrapolation, la consommation annuelle effective d'énergie:

$$E_1 = P_1 \times t_e = U_N \times I_0 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi \times t_e$$

E_1 consommation annuelle d'énergie (en kWh/a)

P_1 puissance moyenne absorbée (en kW)

t_e durée d'exploitation (en h/a)

U_N tension du réseau (en V)

I_0 = intensité moyenne de courant absorbée (en A)

Il est alors possible, sur la base de l'intensité de courant absorbée, d'avoir des indications précises sur le fonctionnement de composantes importantes.

- Les entraînements consommant plus de 10 000 kWh/a (ce qui équivaut à une puissance nominale supérieure à 10 kW et à un nombre d'heures d'exploitation de plus de 1000 heures par année) doivent être équipés d'un système permettant de mesurer la consommation ou, mieux, la charge du moteur, afin de déterminer la consommation d'énergie effective, même en cas d'exploitation discontinue et de charge variable.

Lorsque les installations sont munies d'un système de transmission des données, ces dernières doivent être relevées en permanence et enregistrées

dans une base de données. Il n'est par exemple pas normal que la consommation varie ou augmente fortement alors que le mode d'exploitation est resté stable.

Outre leur fonction première, les systèmes de transmission des données actuels permettent également d'établir des statistiques, ce qu'il conviendrait de faire en tout cas pour:

- les stations de relevage,
- les dessableurs aérés,
- le traitement biologique,
- le traitement des boues,
- l'épuration de l'air vicié.

Équiper toutes les composantes d'installations importantes de dispositifs de mesurage et les installations de systèmes de commande ou de régulation récents

4.3.3 Commande et régulation de l'apport d'oxygène

Le traitement biologique et, plus particulièrement, l'apport d'oxygène qu'il requiert sont de loin les plus gros consommateurs d'énergie des STEP (entre 60 et 80% de la consommation totale, cf. chap. 3.51). Pour réduire cette consommation, les différents systèmes de commande et de régulation doivent être adaptés aux besoins effectifs par le biais de l'un ou l'autre des appareils ci-après (cf. également chap. 35.3):

1. Les capteurs directs („on-line“)

Les capteurs directs, de même que les instruments semi-directs, permettent de suivre pas à pas le déroulement du traitement biologique.

Sondes à oxygène

Il est impossible de régler l'apport d'oxygène sans mesurer la quantité d'oxygène dissous. Les sondes prévues à cet effet, très fiables, peuvent être utilisées une à deux semaines sans nettoyage/étalonnage. Les valeurs réelles qu'elles fournissent sont comparées avec les valeurs cibles dans le régulateur qui, en fonction de la différence entre ces deux grandeurs, détermine la quantité d'oxygène nécessaire.

Instruments d'analyse de l'ammonium et du nitrate

Les installations de nitrification et de dénitrification ayant pour but de réduire au minimum les charges d'ammonium et de nitrate, elles doivent être équipées non seulement d'un système réglant la teneur en oxygène, mais également d'un dispositif mesurant la quantité d'ammonium et de nitrate. Un accrois-

sement de la concentration d'ammonium entraîne une élévation de l'apport d'oxygène et vice-versa.

A défaut d'appareil de mesure on-line, on utilise ici des instruments d'analyse. Bien que leur prix d'achat se situe entre 50 000 et 150 000 francs et que les coûts d'exploitation et d'entretien (produits chimiques) soient élevés, leur acquisition se justifie pleinement. En effet, ils permettent d'abaisser de 15% la consommation d'énergie requise pour l'apport d'oxygène. L'économie ainsi réalisée suffit, dans une STEP de 20 000 EH déjà, pour payer les intérêts et l'amortissement d'un investissement de 100 000 francs et pour contribuer aux coûts d'exploitation à raison de 5 000 francs par année.

Les sondes redox

Ces sondes déterminent le potentiel redox des boues activées. Elles sont pourvues d'un système de commande qui enregistre le rapport entre les courbes du nitrate et de l'ammonium et le potentiel redox. Ces courbes indiquent avec précision le moment où les phases de nitrification et de dénitrification sont achevées et où l'aération doit être enclenchée ou déclenchée dans les zones correspondantes. Pour plus de détails sur le fonctionnement de ces sondes, voir la littérature spécialisée [53].

Comparées à un système commandant la nitrification/dénitrification uniquement sur la base de la teneur en oxygène, les sondes redox permettent d'atteindre de bien meilleures valeurs de rejet du NO_3 et d'économiser jusqu'à 20% d'énergie [53]

2. La régulation par zone (de bassin)

Lorsque les bassins sont équipés uniquement de sondes à oxygène et que le brassage n'est pas optimal (cf. chap. 3.5.4), il faut installer des dispositifs de mesure et de réglage dans chaque zone, car, expérience faite, le comportement de l'oxygène varie fortement d'une zone à l'autre.

3. Les organes de réglage

Ces appareils sont conçus pour fournir l'air sur la base d'un diagramme. Les modèles les plus performants sont munis de vannes à diaphragme (préférables aux vannes plates) et leur plage de réglage est de l'ordre d'une seconde, de manière que le changement d'ouverture des vannes ne dépasse pas 1 à 2%.

4. Le mode de réglage

La procédure ci-dessous décrit la marche à suivre pour une installation équipée de soufflantes à piston rotatif et de dispositifs mesurant l'oxygène dans toutes les zones des bassins:

1. installer un régulateur dans chaque zone et programmer les différents organes de manière qu'ils réagissent en fonction de la différence entre les valeurs cibles et les valeurs effectives de la teneur en oxygène;
2. déterminer le besoin d'oxygène en fonction de la somme des différences entre les valeurs cibles et les valeurs effectives enregistrées par les circuits de réglage, ou en fonction de la somme de toutes les positions des vannes, ou encore en fonction du débit d'air requis;

3. commander la puissance des soufflantes selon une courbe - calculée par voie théorique ou pratique - représentant cette puissance soit en fonction de la somme des différences entre les valeurs cibles et les valeurs réelles, soit en fonction de la somme de toutes les positions des vannes;
4. adjoindre à la commande des soufflantes un système réglant la pression, afin que cette dernière soit toujours optimale;
5. programmer les ordres de commande aux soufflantes en fonction de la somme des ordres de commande et de régulation mentionnés ci-dessus.

5. L'adaptation des systèmes de commande et de régulation

Le mode de commande et de régulation varie selon que l'air comprimé est produit

- par des turbocompresseurs: les déperditions de pression doivent alors être maintenues à un minimum absolu par des vannes de réglage; la valeur cible est obtenue à partir de la vanne la plus ouverte;
- par des soufflantes à piston rotatif: celles-ci doivent être réglées en fonction du besoin d'air effectif; une soupape au moins doit avoir un angle d'ouverture de 90%, ce qui nécessite la pose d'un régulateur de pression (cf. point 4 ci-dessus).

6. Les régulateurs adaptables

Ces appareils, dont l'usage est indispensable, peuvent désormais être programmés au moyen d'un software. L'investissement est donc nettement moins élevé que pour les modèles réglés par hardware, car un seul logiciel suffit pour plusieurs régulateurs.

7. Les valeurs cibles

Si les circuits de réglage ont été correctement ajustés, il n'est pas nécessaire de prévoir de marge de sécurité pour déterminer les valeurs cibles requises pour la régulation de l'oxygène, de l'ammonium ou du nitrate et les points d'enclenchement (en cas de régulation redox)

4.3.4

Les systèmes de commande des STEP: conseils pratiques

- Les pompes de recirculation des boues et les pompes assurant la recirculation à l'intérieur des bassins à boues activées exploités en anoxie offrent de grandes possibilités d'économie. En mesurant le volume d'eaux usées à l'entrée des bassins, il est possible de régler ou de commander la puissance requise et, parallèlement, de doser l'apport des agents de floculation. Si le volume transporté dépend de façon plus ou moins linéaire de la vitesse de rotation, il n'est pas nécessaire d'installer un système de régulation: il suffit de commander le volume des boues en retour (en déterminant un rapport fixe entre la vitesse de rotation des pompes et le volume à l'entrée, sans se préoccuper du volume de boues effectivement transporté). La suppression du circuit de réglage oscillant équivaut à une économie d'énergie non négligeable.
- Les installations de dégrillage et les tapis roulants peuvent également être exploités en fonction du besoin et doivent, à cette fin, être équipés d'un système de commande: les dégrilleurs, réglés en fonction de la différence de niveau, sont dotés d'une commande horaire. Les tapis roulants, vis d'Archimède, etc., doivent être enclenchés en conséquence, mais le moins longtemps possible.
- La pose d'une commande FIFO (first in, first out: enclenchement et déclenchement cycliques des éléments plutôt que par ordre de priorité) pour les installations à plusieurs lignes (dégrilleurs à plusieurs lignes, installa-

tions à plusieurs pompes, etc.) permet d'éviter leur enclenchement répété et contribue, ce faisant, à économiser de l'énergie.

Le nombre de lavage des filtres en discontinu peut être réduit en programmant le système de commande en fonction du degré d'encrassement ou de l'augmentation de la perte de charge.

Les producteurs d'air comprimé pneumatiques et les pompes à eau industrielle peuvent être enclenchés et déclenchés en fonction des besoins au moyen d'un système commandant la pression.

Les différentes lignes (des dégrilleurs, bassins de décantation primaire, filtres, centrifugeuses, presses, etc.) peuvent être déclenchés automatiquement en cas de charge partielle ou être munies d'un signal sonore avertissant qu'elles peuvent être déclenchées. Une analyse énergétique effectuée dans une STEP de 54 000 EH a révélé que les pompes et les soufflantes utilisées pour le lavage des filtres étaient enclenchées 920 secondes. Leur puissance étant de 45 kW, elles consommaient 4 197 kWh/a. C'est dire qu'il vaut la peine de prévoir un système de déclenchement automatique en cas de charge partielle.

- Les systèmes de commande peuvent être dimensionnés de façon que les appareils soient exploités de façon optimale (exemple: si une installation est munie de deux petites pompes et d'une grosse, on actionnera, selon la

charge, la grosse plutôt que les deux petites ou inversement).

- Les brasseurs, qui n'ont la plupart du temps pas besoin de fonctionner en continu, peuvent être dotés de systèmes de commande marche/arrêt. Les économies d'énergie seront proportionnelles au temps de pause.
- L'extraction des boues fraîches peut être commandée en fonction non pas d'une durée donnée, mais de valeurs limites de volume ou de turbidité: seules les boues fraîches ayant une certaine teneur en matière sèche sont extraites. Le système doit être programmé en tenant compte du cycle de vidange.
- Le volume des boues en excès qui doivent être extraites peut être déterminé en mesurant le débit et être maintenu dans des limites données. L'extraction en fonction de la durée est nettement moins précise et suppose une marge de sécurité augmentant inutilement la durée de fonctionnement des pompes.
- Les opérations telles que le lavage des conduites d'aération de la biologie, l'extraction du sable contenu dans les dessableurs, le lavage des filtres, etc., peuvent être effectuées pendant les heures où le tarif du courant est moins cher.
- Les consommateurs de courant non utilisés en dehors des heures de travail (écrans, lampes témoins, une partie des installations de ventilation, etc.) peuvent être pourvus d'un interrupteur général automatique.
- Il est également possible d'équiper les transformateurs d'alimentation d'un système de déclenchement automatique, ce qui permet d'éviter les pertes dues à la marche à vide.
- Un système de contrôle de la charge électrique (cf. chap. 4.3.6) permet d'éviter les pointes: le lavage d'un filtre en discontinu, par exemple, peut être enclenché uniquement lorsque le besoin total d'énergie est inférieur à la valeur limite.

4.3.5

La consommation des systèmes de commande: économies réalisables

La consommation des systèmes de commande peut être abaissée en adoptant les mesures suivantes:

- préférer les commandes directes aux relais;
- supprimer les convertisseurs de mesure inutiles: relever directement les signaux de sortie PT1 00, sans les convertir en 4-20mA;
- alimenter les convertisseurs de mesure avec du courant alternatif à basse tension, ce qui permet de supprimer les appareils d'alimentation à courant continu (et les pertes);
- remplacer les appareils à consommation d'énergie spécifique élevée par des modèles plus récents (exemple: appareil de mesure du débit à induction magnétique);
- supprimer les composantes des systèmes de commande qui ne sont plus utilisées, afin d'éliminer les pertes dues à la marche à vide.

Exemple 1

Dans une STEP de moyenne dimension, 130 convertisseurs de mesure sont alimentés par 10 appareils d'alimentation à courant continu dont la puissance absorbée est de 170 W ($P_N = 210$ W). Leur consommation d'électricité se monte à 14 800 kWh/a. En les alimentant avec du courant alternatif à basse tension, on supprime les pertes des appareils d'alimentation, ce qui permet d'économiser 5 920 kWh/a (40%).

Exemple 2

Dans une STEP de grande dimension, 20 appareils de mesure du débit à induction requièrent chacun une puissance de 100 W et consomment à eux tous 17 500 kWh/a. Leur remplacement par des modèles récents d'une puissance de 10 W permet de réduire la consommation d'énergie de 90% (15 750 kWh/a) et d'économiser, au prix actuel de 14 ct/kWh, 32 000 francs.

4.3.6

Réduction de la demande de puissance de pointe

Une part importante des factures d'électricité est due à la puissance de pointe consommée qui est déterminée toutes les 15 minutes. Si, durant la période que couvre une facture, la STEP consomme un maximum de 100 kW, à l'exception d'un seul quart d'heure où elle en consomme 200 kW, la facture est établie sur la base de ces 200 kW pour toute la période. Il vaut donc la peine d'installer un contrôleur de puissance maximale: réglé en fonction des dernières valeurs de puissance maximale consommée pendant 1.5 minutes et enregistrée pendant une période de facturation, cet appareil transmet des signaux de libération ou de blocage aux différents consommateurs ou groupes de consommateurs, afin que cette valeur de pointe ne soit pas dépassée.

Le besoin de puissance de pointe peut être réduit notamment:

- en contrôlant la charge (exemple: déclenchement ou verrouillage de certains consommateurs lorsque le besoin de puissance de pointe est élevé);
- en installant des appareils de moindre puissance exploités sur de plus longues périodes;
- en équipant les moteurs de systèmes à démarrage doux.

4.4 Les autres consommateurs d'électricité : économies réalisables

4.4.1 Les vannes et les soupapes

Vannes

L'ouverture et la fermeture des vannes par des moteurs permet de réduire les déperditions lors de la production d'air comprimé et, par conséquent, la consommation d'électricité que requiert la compensation de ces pertes, auxquelles s'ajoutent encore les pertes de distribution et de stockage.

Soupapes de réglage

Les soupapes devraient également être actionnées par des moteurs, à l'exception des circuits de réglage réagissant vite, pour lesquels il est préférable d'utiliser des entraînements pneumatiques.

Régulateurs de position électro-pneumatiques :

Les modèles utilisés depuis un certain nombre d'années perdent beaucoup d'air comprimé et devraient être remplacés par des appareils fonctionnant, par exemple, selon le principe piézo-électrique.

Soupapes magnétiques

Les soupapes magnétiques (soupapes pilotes) sont utilisées pour commander l'air comprimé dans les procédés automatisés. Les nouveaux modèles sont actionnés par des bobines d'environ 3 watts, contre 8 watts pour les anciens.

Les soupapes magnétiques qui ont une longue durée d'enclenchement doivent - si possible - être remplacées par des modèles bistables. Cette mesure n'est toutefois rentable que dans le cadre d'une construction nouvelle ou d'une transformation importante, car elle nécessite une modification du système de commande.

4.4.2

Les consommateurs d'électricité dans les bâtiments

La marche à suivre pour optimiser la consommation électrique dans les bâtiments et les valeurs indicatives de dimensionnement sont décrites dans la Recommandation SIA 380/4. Les ouvrages cités sous [7] et [57] donnent également des précisions dans ce domaine. Seuls les aspects spécifiques aux STEP sont ici brièvement traités.

Éclairage intérieur

D'une façon générale, il convient de remplacer les ampoules à incandescence par des ampoules économiques (lampes à décharge) et d'éviter les lampes halogènes. Par ailleurs, il faut :

- utiliser des luminaires fluorescents à haut rendement permettant d'obtenir la même force d'éclairage avec moins d'unités;
- équiper de programmeurs électroniques les luminaires fluorescents dont la durée d'éclairage est supérieure à 1 000 heures par année;
- renoncer à l'éclairage des locaux bénéficiant de la lumière du jour ou le régler en conséquence;
- installer des cellules photo-électriques à déclenchement automatique selon l'intensité de la lumière du jour (en série dans les locaux plus grands), chaque source lumineuse devant être rallumée manuellement;
- prévoir éventuellement des systèmes de commande réglés en fonction du temps d'utilisation des locaux (exemple: installer des capteurs de mouvement dans la galerie d'alimentation en énergie et autres lieux où l'on ne fait que passer, ainsi que des pontages au cas où une présence plus longue s'avérerait nécessaire).

Appareils de bureau et de laboratoire

Ce groupe de consommateurs a certes une part peu importante à la consommation d'électricité globale d'une STEP, mais il vaut quand même la peine de procéder à une optimisation énergétique (cf. la norme SIA 380/4 et [51]).

En bref, il suffit:

- de se fixer comme critère prioritaire la consommation spécifique d'électricité à l'achat de tout nouvel appareil;
- d'éteindre les appareils non utilisés, même pour un court moment;
- d'équiper les photocopieuses et les appareils de laboratoire d'horloges permettant leur mise en veilleuse;
- de supprimer les réfrigérateurs inutilisés.

Rendement lumineux (l_m)

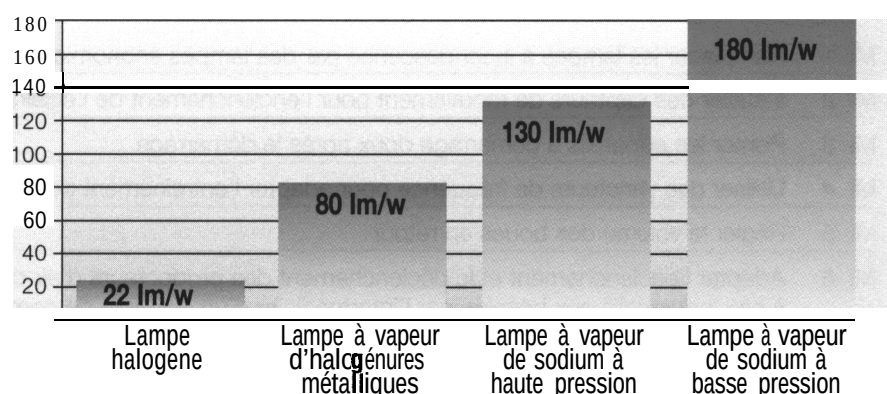


Illustration 4-1 6

Rendement de divers types de lampes destinées à l'éclairage extérieur

4.4.3

Eclairage extérieur

Le rendement des différents types de lampes destinées à l'éclairage extérieur varie fortement (illustration 4-16). Les lampes à vapeur de sodium à basse pression, p. ex., ont un rendement huit fois plus élevé que celui des lampes halogènes pour une même puissance électrique.

Les lampes à haut rendement présentent toutefois des inconvénients, notamment pour ce qui est du rendu des couleurs, du démarrage à basse température et du réenclenchement. Il convient donc de faire appel à des spécialistes afin qu'ils déterminent quels luminaires et quelles ampoules se prêtent le mieux à l'usage prévu.

L'altération des couleurs n'étant pas importante à l'extérieur, on peut en tout cas utiliser des lampes à vapeur de sodium à basse pression.

L'éclairage extérieur doit être enclenché et déclenché en fonction de la lumière du jour au moyen de cellules photo-électriques et la durée d'enclenchement réglée par une horloge.

4.5 Tableaux synoptiques des mesures à prendre

Mesures à prendre

- immédiatement: Mi
- à court terme: Mct
- avec d'autres mesures: Ma (cf. chap. 7.3)

N°	Mesures immédiates	voir chapitre
Mi 1	Remplacer les lampes à incandescence par des lampes économiques	4.4.2
Mi 2	Installer des capteurs de mouvement pour l'enclenchement de l'éclairage	4.4.2
Mi 3	Ponter les appareils à démarrage doux après le démarrage	4.2.4
Mi 4	Utiliser des variateurs de fréquence pour adapter l'entraînement des machines au besoin	4.2.6
Mi 5	Régler le volume des boues en retour	4.3.4
Mi 6	Adapter l'enclenchement et le déclenchement des producteurs d'air comprimé et des pompes à eau industrielle aux besoins par l'intermédiaire d'un système de commande de la pression	4.3.4
Mi 7	Installer des horloges pour réduire le nombre d'heures d'exploitation	4.3.1
Mi 8	Donner aux employés des instructions précises afin qu'ils utilisent les dispositifs techniques de façon optimale	4.3.2
Mi 9	Régler les systèmes en fonction des valeurs limites optimales	4.3.1
Mi 10	Adopter un mode de régulation pour l'apport d'air dans les bassins à boues activées	4.3.1
Mi 11	Remplacer les entraînements et moteurs à courant continu par des moteurs asynchrones triphasés munis de variateurs de fréquence	4.3.1
Mi 12	Supprimer les composants des systèmes de commande non utilisés	4.2.6

N°	Mesures à court terme	voir chapitre
Mct 1	Remplacer les régulateurs de position électro-pneumatiques par des appareils à air comprimé (moins de pertes)	4.4.1
Mct 2	Utiliser des soupapes magnétiques de puissance ≤ 5 watts	4.4.1
Mct 3	Remplacer les anciens moteurs par des modèles plus récents, bien dimensionnés et de meilleur rendement	4.2.4
Mct 4	Doser l'apport d'air dans les bassins à boues activées en fonction des besoins	4.3.3
Mct 5	Utiliser des variateurs de fréquence pour les entraînements dont le besoin de puissance est variable	4.2.6
Mct 6	Doser l'apport d'agents de floculation en fonction de la teneur en phosphate au cours du traitement biologique et de la filtration	4.3.4

N°	Mesures à court terme	voir chapitre
Mct 7	Utiliser des systèmes de commande pour les dégrilleurs et les ajuster en fonction du niveau maximal	4.3.4
Mct 8	Installer des transformateurs d'alimentation à déclenchement automatique afin d'éviter des pertes dues à la marche à vide	4.3.1
Mct 9	Installer des compensateurs d'énergie réactive	4.2.4
Mct 10	Utiliser des appareils à démarrage doux (évent. munis de modules permettant d'économiser de l'énergie)	4.2.4
Mct 11	Remplacer les systèmes réglant des processus complexes par des régulateurs adaptables	4.3.3
Mct 12	Relever périodiquement (une fois par mois au minimum) toutes les données relatives à la consommation d'énergie, les exoloyer et prendre note des dysfonctionnements	4.3.2
Mct 13	Installer des systèmes de mesure de la consommation énergétique pour tous les moteurs dont la puissance dépasse 10 000 kWh/a	4.3.2
Mct 14	Installer des compteurs horaires pour tous les moteurs dont la puissance dépasse 1 000 kWh/a	4.3.2
Mct 15	Installer des systèmes permettant de commander les dégrilleurs et les tapis roulants en fonction des besoins	4.3.1
Mct 16	Adapter l'enclenchement et le déclenchement des producteurs d'air comprimé et des pompes à eau industrielle aux besoins par l'intermédiaire d'un système de commande de la pression	4.3.1
Mct 17	Exploiter les brasseurs par intermittence	4.3.1
Mct 18	Régler l'extraction des boues fraîches en fonction des valeurs limites (en mesurant le volume ou la turbidité, par exemple)	4.3.4
Mct 19	Commander l'extraction des boues en excès à partir de mesures et non en fonction du temps	4.3.4
Mct 20	Installer des interrupteurs généraux pour les consommateurs non utilisés en dehors des heures de travail	4.3.1
Mct 21	Installer des appareils de déclenchement automatique pour les transformateurs d'alimentation	4.3.2
Mct 22	Remplacer les anciens systèmes de mesure, gros consommateurs d'énergie (les appareils de mesure du débit à induction, p. ex.)	4.3.5

N°	Mesures à prendre avec d'autres	voir chapitre
Ma 1	Dédoubler les gros systèmes d'entraînement en installant des modèles plus petits pour l'exploitation en charge partielle	4.2.4
Ma 2	Remplacer les entraînements pneumatiques des vannes d'ouverture et de fermeture par des moteurs	4.4.1
Ma 3	Remplacer les régulateurs de position électro-pneumatiques par des modèles fonctionnant selon le principe piézo-électrique, p. ex. (moins de pertes)	4.4.1
Ma 4	Installer des appareils de contrôle de la charge (puissance de pointe, surveillance et commande)	4.3.4
Ma 5	Exploiter les très gros systèmes d'entraînement à une puissance nominale plus élevée (660 V, p. ex.)	4.2.4
Ma 6	Installer des déclenchements automatiques pour les différentes lignes en cas de charge partielle	4.3.3



5. Mesures d'économie d'énergie thermique

	pages
5.1 Introduction	134
5.2 L'énergie de production	136
5.2.1 Chauffage des boues et du digesteur	136
5.2.2 Les mesures d'économie d'énergie	141
5.2.3 Les chauffages électriques	142
5.3 Le chauffage des bâtiments	144
5.3.1 Bases et exigences	144
5.3.2 Exigences posées en cas de construction nouvelle et de transformation	144
5.3.3 Bâtiments existants	145
5.3.4 Utilisation des énergies renouvelables	145
5.3.5 La production d'eau chaude	145
5.4 Les producteurs de chaleur classiques	146
5.5 Tableaux synoptiques des mesures à prendre	147

5.1 Introduction

Dans la plupart des stations d'épuration de moyenne et grande capacité, la stabilisation des boues est effectuée par voie anaérobie mésophile. Ce procédé requiert une grande quantité d'énergie thermique pour :

- chauffer les boues froides,
- couvrir les pertes de transmission, de production, de stockage et de distribution

Dans ce type de STEP, la quasi-totalité de la consommation d'énergie thermique est imputable au traitement des boues. Seule une faible part de chaleur est utilisée pour le chauffage des locaux et de l'eau (cf. chap. 2.1). Précisons toutefois que les locaux d'exploitation ne sont chauffés que dans les STEP de moyenne et grande dimension, et encore : uniquement les bureaux et les ateliers.

Si le traitement des boues requiert une grande quantité d'énergie thermique, il produit également un grand volume de gaz de digestion. Or, une bonne utilisation de ce dernier au moyen d'installations de couplage chaleur-force (CCF) permet, en temps normal, de couvrir non seulement la totalité du besoin d'énergie thermique, mais aussi une grande partie du besoin d'électricité.

Le présent chapitre est consacré essentiellement à la description des mesures pouvant être prises. Les possibilités d'économies d'énergie sont développées au chapitre 3. Quant à la production de chaleur et d'énergie des installations classiques, elle fait l'objet du chapitre 5.4, le chapitre 6 traitant de la valorisation du gaz de digestion et d'autres agents énergétiques.

La recommandation SIA 380/1 décrivant très en détail les possibilités d'optimisation énergétique dans les bâtiments, le chapitre 5.3 ne fait qu'aborder le sujet. Pour ce qui est de la chaleur de procédé, enfin, le chapitre 5.2 ne traite que des questions spécifiques aux stations d'épuration.

Besoin d'énergie thermique

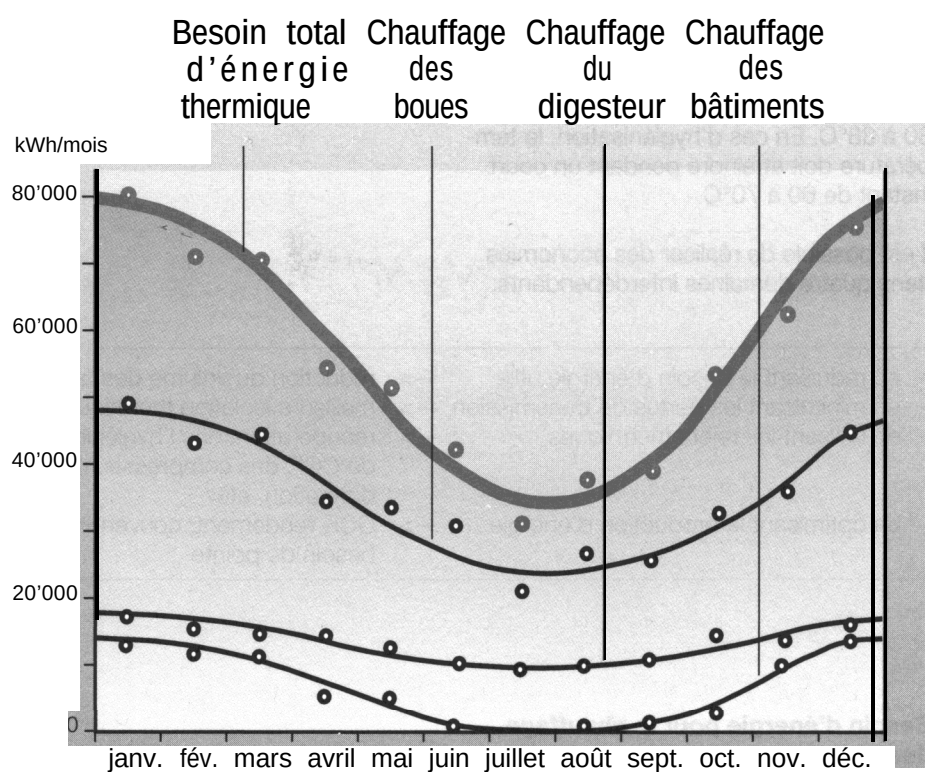


Illustration 5-1

Besoin d'énergie thermique (énergie utile) requis par le chauffage des boues, des digesteurs et des bâtiments, de même que par la somme de ces trois consommateurs dans une STEP stabilisant les boues par voie anaérobie mésophile (digestion des boues)



5.2 L'énergie de production

5.2.1

Chauffage des boues et du digesteur

Aspects techniques

Les boues soumises à un traitement anaérobie mésophile doivent être chauffées toute l'année à une température de **30 à 38°C**. En cas d'hygiénisation, la température doit atteindre pendant un court instant de 60 à 70°C.

Il est possible de réaliser des économies dans quatre domaines interdépendants:

- en réduisant le besoin d'énergie utile	->	réduction du volume des boues
- en minimisant les pertes de transmission	->	meilleure isolation thermique
- en utilisant les rejets thermiques	->	récupération, des l'hygiénisation de CCF, des compresseurs d'aération, etc.
- en optimisant la production d'énergie	->	CCF, rendement, couverture du besoin de pointe

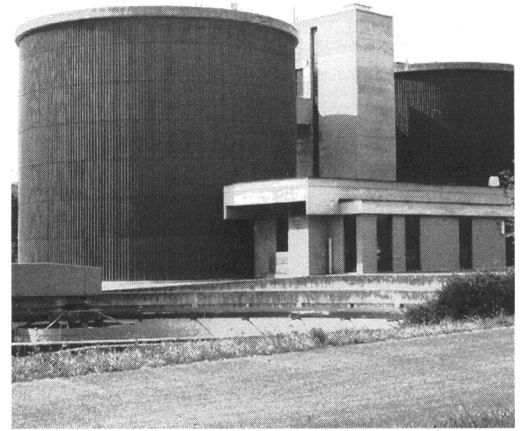
Besoin d'énergie pour le chauffage des boues

Le besoin d'énergie requis pour le chauffage des boues dépend essentiellement de leur volume et de leur température, à savoir de l'intervalle de température entre le digesteur et l'air extérieur/le sol. La courbe annuelle de ce besoin est typique (illustration 5-1).

La formule ci-après prend en compte uniquement l'énergie utile, sans tenir compte des pertes de production, de stockage et de distribution qui seront traitées, selon le type de production de chaleur, dans les chapitres suivants:

- rendement moyen du gaz de digestion en cas d'installations CCF: chap. 6;
- rendement moyen des installations de production de chaleur classiques: chap. 5.4.

Des mesures d'économie d'énergie thermique? Oui, pour autant qu'il soit possible de réduire la consommation d'énergie finale et les coûts énergétiques.



Le besoin de chaleur Q_b requis pour chauffer les boues se calcule de la façon suivante:

$$Q_b = V \times \Delta t \times c_s = V \times (t_{\text{dig}} - t_{\text{bf}}) \times c$$

Q_b	besoin de chaleur (énergie utile) requis pour le chauffage des boues en MJ/a
V	volume de boues en m^3/a
t_{bf}	température des boues fraîches en $^{\circ}\text{C}$
t_{dig}	température du digesteur en $^{\circ}\text{C}$
c_s	chaleur spécifique des boues fraîches en $\text{MJ}/\text{m}^3 \text{ K}$

Comme les boues fraîches contiennent plus de 95% d'eau, on peut calculer, en première approximation, la chaleur spécifique de l'eau ($c_s = 4,19 \text{ MJ}/\text{m}^3 \text{ K}$)

Exemple Dans la STEP modèle, le digesteur est alimenté quotidiennement par $6,4 \text{ m}^3$ de boues fraîches déshydratées (MS: 25%). La température du digesteur est de 33°C tout au long de l'année. La température annuelle moyenne pondérée des boues fraîches est de 17°C .

Volume annuel de boues (m^3):

$$v = 365 \text{ d/a} \times 6,4 \text{ m}^3/\text{d} = 2\,336 \text{ m}^3/\text{a}$$

Besoin de chaleur annuel (Q_b):

$$Q_b = 2\,336 \text{ m}^3/\text{a} \times (33^{\circ}\text{C} - 17^{\circ}\text{C}) \times 4,19 \text{ MJ}/\text{m}^3 \text{ K}$$

$$Q_b = 156,6 \text{ GJ/a}$$

Produite par une installation de chauffage classique dont le rendement moyen est de 0,80, cette quantité de chaleur requerrait 196 GJ/a d'énergie finale ($4\,584 \text{ kg}$ de mazout, par exemple).

Besoin de chaleur requis pour le chauffage du digesteur

La température du digesteur étant toute l'année supérieure à la température extérieure, celui-ci dégage de la chaleur en permanence. Le calcul de ces pertes de transmission par m² de surface de digesteur est simple: il s'effectue à partir de l'intervalle de température entre le digesteur et le milieu ambiant (air extérieur ou sol) au moyen du coefficient de transmission de chaleur k (cf. SIA 380/

3). La valeur k, qui varie selon le matériau de construction, indique la transmission de chaleur spécifique d'un élément de construction par m² de surface et par intervalle de température exprimée en kelvin.

La puissance thermique des pertes de transmission (énergie utile) est obtenue comme suit:

$$P_t = \frac{S \times \Delta t \times k}{1000} = \frac{S \times (t_{dig} - t_{ext}) \times k}{1000}$$

P_t pertes de transmission en kW
 S surface du digesteur en m²
 t_{dig} température du digesteur en °C
 t_{ext} température extérieure en °C
 k coefficient de transmission de chaleur en W/m² K

L'intervalle de température entre le digesteur et l'air extérieur ou le sol est la valeur moyenne de toute la période de calcul (une année). Les températures extérieures moyennes sont énumérées dans la recommandation SIA 380/1. La valeur moyenne annuelle de la température du sol équivaut à celle de l'air (SIA 384/2).

La consommation annuelle d'énergie utile s'obtient donc comme suit:

$$Q_t = P_t \times 8760 \text{ h/a} \times \frac{0,0036 \text{ GJ}}{\text{kW}}$$

Q_t pertes de transmission annuelles en GJ/a
 P_t pertes de transmission en kW

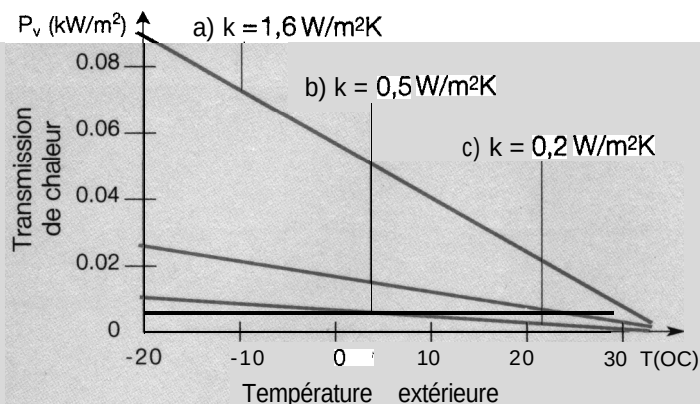


Illustration 5-2
Pertes de transmission par m² de surface du digesteur (modèles usuels, température: 33°C) pour différentes températures extérieures:
a) isolation insuffisante
b) systèmes d'isolation courants
c) digesteurs bien isolés

Les pertes de transmission d'un digesteur doivent être calculées pour chaque surface de matériau de construction en prenant en compte les intervalles de température entre le digesteur et l'air extérieur ou le sol ainsi que les valeurs k y relatives. Lorsque les valeurs d'approximation sont suffisantes, on peut utiliser les mêmes paramètres pour les différentes portions de surface et calculer la transmission de chaleur à partir des valeurs moyennes.

Exemple

Le digesteur de la STEP modèle a un volume (V) de 900 m³. La surface du digesteur peut être subdivisée en trois surfaces partielles ayant les mêmes paramètres:

Puissance spécifique des pertes de transmission p_t :

$$p_t = \frac{P_t}{V} = \frac{3760 \text{ W}}{900 \text{ m}^3} = 4,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

=> La puissance spécifique des pertes de transmission du digesteur est très faible.

Pertes de transmission annuelles Q_t :

$$Q_t = 3,76 \text{ kW} \times 8\,760 \text{ h/a} \times \frac{0,0036 \text{ GJ}}{\text{kW}}$$

$$Q_t = \underline{\underline{119 \text{ GJ/a}}}$$

Optimisation de la consommation totale d'énergie thermique

Pour optimiser la valeur k d'un digesteur ainsi que le rendement de la production de chaleur, il faut prendre en compte la totalité de la consommation d'énergie finale. Pour le chauffage des boues et du digesteur, il s'agit d'optimiser également les pertes de production, de stockage et de distribution, qui constituent une part importante de la consommation totale.

L'isolation thermique du digesteur et le rendement de l'installation de chauffage doivent être améliorés uniquement si les coûts annuels ainsi engendrés (pour les calculs de rentabilité, cf. chap. 7.4) égaient plus ou moins les économies annuelles réalisées, renchérissement de l'énergie inclus.

Surface partielle	Surface m ²	Intervalle de température (K)	Valeur k (W/m ² K)	Puissance des pertes de transmission (kW)
Parois	425	21	0,32	2,86
Fond	40	23	0,40	0,37
Toit	80	19	0,35	0,53
TOTAL	545			3,76

Des mesures d'économie d'énergie thermique? Oui, si le besoin énergétique manquant ne peut être couvert que par des agents énergétiques fossiles (mazout, gaz naturel),

Rappelons que, dans les STEP équipées d'installations CCF, la valorisation du gaz de digestion suffit pour couvrir le besoin d'énergie thermique. Il convient donc d'investir à bon escient: inutile, en effet, de réduire le besoin thermique des installations si la STEP n'est pas équipée d'un récupérateur de chaleur et que le gaz de digestion doit être éliminé par des torchères. Il vaut alors mieux optimiser la production de ce gaz et acquérir des installations de couplage chaleur-force, qui fournissent de l'électricité de haute valeur énergétique.

On obtient la consommation annuelle d'énergie thermique finale requise par le traitement des boues E_{tb} en additionnant l'énergie consommée par le chauffage des boues et par les pertes de transmission, de production, de stockage et de distribution:

$$E_{tb} = Q_b + Q_t + Q_d$$

$$\eta = \frac{E_b + Q_t}{E_{tb}}$$

E_{tb}	énergie thermique finale requise par le traitement des boues en GJ/a
Q_b	besoin d'énergie thermique utile requise par le chauffage des boues en GJ/a
Q_t	pertes de transmission (énergie utile) dues au chauffage du digesteur en GJ/a
Q_d	pertes de production, de stockage et de distribution en GJ/a
η	rendement moyen

Les frais de consommation d'énergie ($F_{én}$) sont calculés en fonction de la durée moyenne d'amortissement des investissements:

$$C_{th} = F_{én} \times C_{fin} \times m_{én}$$

C_{th}	coût de l'énergie thermique en frs/a
C_{fin}	coût de l'énergie finale en frs/a
$m_{én}$	facteur de correction moyen pour le renchérissement de l'énergie (SIA 380/1 cf. chap. 7.4)

En tenant compte des conditions ci-dessus d'une part et des conditions locales d'autre part, la valeur k optimale

et le rendement moyen doivent être déterminés de cas en cas du point de vue énergétique et économique.

5.2.2 Les mesures d'économie d'énergie

Chauffage des boues

La quantité d'énergie requise pour chauffer les boues est déterminée uniquement par des grandeurs physiques. Toutefois, elle peut être réduite en optimisant la technique de procédé (réduction du volume de boues à chauffer par un meilleur épaissement primaire, p. ex., cf. chap. 3).

Pertes de transmission

Les pertes de transmission peuvent être réduites par une meilleure isolation des réservoirs, des conduites, de l'appareillage, etc. Les techniques d'isolation thermique font l'objet de tests depuis des années. Les progrès réalisés à ce jour se limitent à des matériaux isolants ayant des valeurs k plus élevées, ce qui influe sur l'épaisseur de l'isolation, mais pas sur le pouvoir isolant.

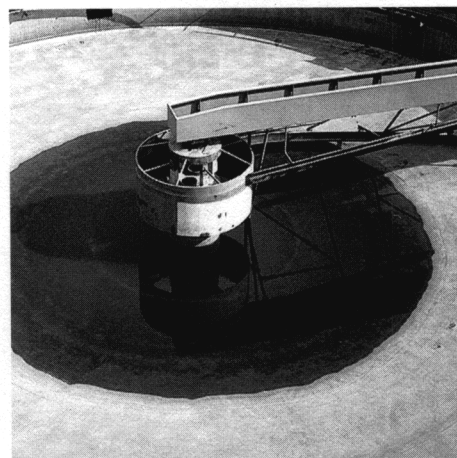
Pour isoler les différentes composantes d'une installation, il y a lieu en priorité:

1. de dimensionner l'épaisseur de l'isolation en fonction de la consommation totale d'énergie;
2. d'isoler toutes les composantes, y compris l'appareillage et les raccords;
3. d'éviter les ponts de transmission de chaleur, par exemple par la pose de coquilles d'isolation.

Rejets thermiques

Les rejets thermiques peuvent être récupérés de différentes manières selon leur origine:

- rejets thermiques issus du processus d'hygiénisation: si l'installation de récupération est dimensionnée de façon optimale, une grande part de l'énergie thermique utilisée pour hygiéniser les boues peut être récupérée pour le préchauffage des boues froides;
- rejets thermiques produits par les compresseurs d'air: ils peuvent être récupérés, dans l'ordre:
 - pour alimenter les échangeurs de chaleur,
 - pour tempérer les locaux en y faisant passer les conduites (protection contre le gel, agencement de l'installation),
 - pour chauffer les locaux de traitement des boues et, ainsi, réduire l'intervalle de température entre le digesteur et l'air extérieur;
- rejets thermiques dégagés dans les locaux abritant les moteurs (entraînements de stations de relevage, compresseurs, p. ex.): faire passer les conduites dans les locaux à tempérer.



5.2.3 Les chauffages électriques

Les chauffages électriques, couramment utilisés à titre de protection contre le gel et comme chauffage d'appoint de la tuyauterie, doivent faire l'objet d'une attention toute particulière, car :

- l'électricité est une forme d'énergie très coûteuse;
- la production de gaz de digestion ne suffit pas à couvrir le besoin d'énergie électrique;
- elle suffit en revanche à couvrir le besoin d'énergie thermique;
- leur consommation d'énergie peut être réduite.

L'électricité étant une forme d'énergie de haute valeur et le gaz de digestion fournissant suffisamment d'énergie thermique, il vaut la peine d'envisager l'utilisation de cette dernière plutôt que de l'électricité.

Voyons brièvement quels sont les consommateurs de chaleur électrique des STEP.

Chauffages d'appoint de la tuyauterie

Les chauffages d'appoint sont exploités presque exclusivement avec de l'énergie électrique. Leur épaisseur d'isolation est souvent minime. De plus, les endroits exposés tels que les coudes et les raccords sont souvent insuffisamment ou mal isolés.

Une bonne disposition des tuyaux permet souvent d'éviter le recours à ces appareils. Si un tuyau doit vraiment être chauffé, on s'assurera qu'il ne peut pas l'être autrement et que la longueur a été réduite au minimum.

Il est absolument primordial de monter l'installation en adoptant les techniques les plus récentes et de bien l'isoler. L'illustration 5-3 montre, en coupe transversale, le montage d'un chauffage d'appoint conforme aux critères énergétiques.

On évitera, par exemple, de poser des câbles chauffants qualifiés à tort d'«cautorégulateurs», car, en réalité, ils ne font que limiter leur propre température maximale en surface et ne tiennent pas compte du besoin effectif de chaleur. Il vaut mieux poser plusieurs capteurs de température le long des tuyaux et doser l'apport d'énergie par portion de tuyau au moyen de régulateurs.

Éviter
les chauffages
électriques.

Chauffages contre le gel

Ces appareils sont utilisés pour protéger du gel les composantes d'installations fonctionnant par intermittence (les vis d'Archimède des dégrilleurs, p. ex.). Exposées aux intempéries, elles sont très souvent mal isolées et consomment une grande quantité d'énergie spécifique. Leur placement à l'intérieur ou leur confinement permettent de renoncer à ces chauffages.

Les entreprises d'électricité interdisent de plus en plus la pose de ce type d'appareils en cas de construction nouvelle.

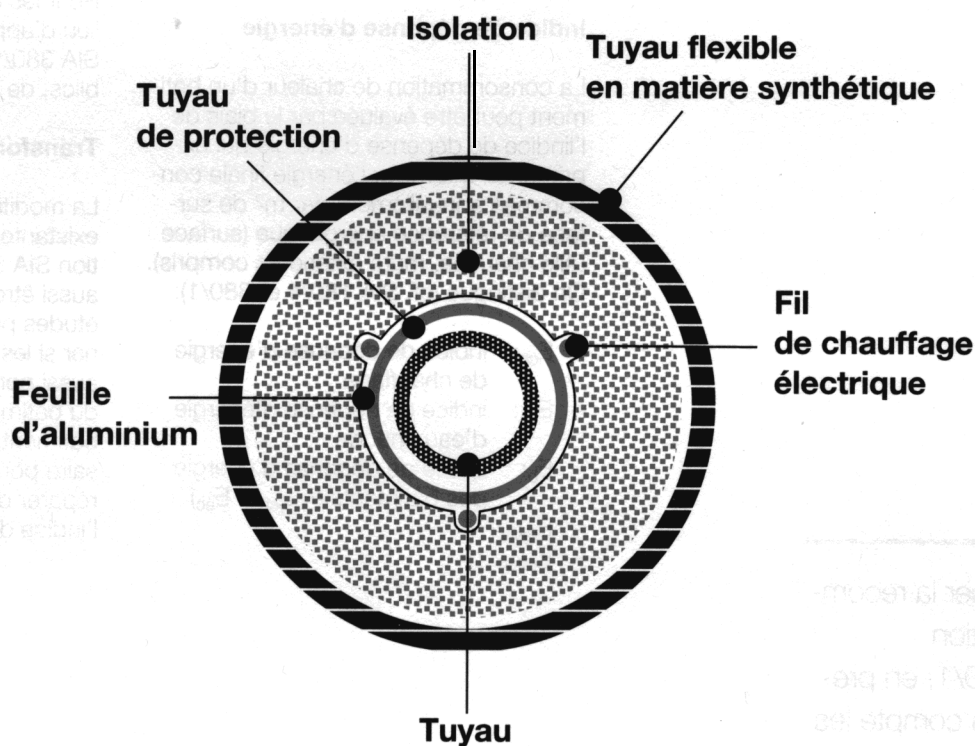


Illustration 5-3

Coup transversale d'un tuyau de chauffage d'appoint énergétiquement correct [59].

5.3 Le chauffage des bâtiments

5.3.1 Bases et exigences

Expériences d'optimisation énergétique

Ces dernières années, de gros progrès ont été réalisés en Suisse en matière de chauffage des bâtiments. En effet, la consommation énergétique des nouvelles constructions a pu être abaissée de 40% par rapport à celles des années 70 et ce, sans que le confort ne s'en ressent. Quant aux STEP existantes ayant fait l'objet de rénovations ou de transformations, leur consommation d'énergie thermique a baissé de 30 à 40%.

Indice de dépense d'énergie

La consommation de chaleur d'un bâtiment peut être évaluée par le biais de l'indice de dépense d'énergie qui exprime, en MJ/m² a, l'énergie finale consommée annuellement par m² de surface de référence énergétique (surface utile chauffée, murs extérieurs compris). On distingue (cf. SIA 180/4 et 380/1):

- E_{ch} : indice de dépense d'énergie de chauffage
- $E_{,,}$: indice de dépense d'énergie d'eau chaude
- E_b : indice de dépense d'énergie des bâtiments ($= E_{ch} + E_{ec}$)
- E_{reste}
- E_{total}

5.3.2 Exigences posées en cas de construction nouvelle et de transformation

La recommandation SIA 380/1 [12] contient non seulement des exigences en matière de qualité énergétique, mais également des indications précises quant à la marche à suivre.

Indépendamment de la quantité de chaleur fournie par la valorisation du gaz de digestion, les exigences légales minimales en matière d'isolation thermique doivent impérativement être respectées.

Constructions nouvelles

Pour les constructions nouvelles, il y a lieu d'appliquer la recommandation SIA 380/1 et, pour les bâtiments publics, de viser à dépasser la valeur cible.

Transformations

La modification de composantes existantes repose sur la recommandation SIA 380/1 et la valeur limite devrait aussi être dépassée. Dans le cadre des études préliminaires, il s'agit de déterminer si les analyses énergétiques doivent aussi porter sur d'autres composantes du bâtiment, voire sur l'ensemble du bâtiment, ce qui peut s'avérer nécessaire pour en améliorer le confort, pour réparer des dégâts ou pour abaisser l'indice de dépense d'énergie trop élevé.

Appliquer la recommandation SIA 380/1, en prenant en compte les rejets thermiques.

5.3.3 Bâtiments existants

Des valeurs comparatives ont été déterminées pour les bâtiments existants. Elles permettent d'évaluer l'urgence d'une rénovation d'ordre thermique. Si elles sont supérieures aux valeurs réelles, il y a lieu de procéder à une analyse énergétique détaillée. Au moment de la transformation, il faut s'efforcer de viser, notamment pour des raisons de rentabilité, les valeurs cibles (valeurs à atteindre après transformation totale).

Les bâtiments existants dans lesquels les indices de dépense d'énergie se situent entre la valeur cible et la valeur réelle doivent être soumis à une analyse énergétique dans le cadre d'une transformation générale (remplacement des chaudières ou des brûleurs, construction d'installations CCF, mesures de construction, etc.)

Les indices de dépense d'énergie des différents types de bâtiments sont énumérés au tableau 5-4.

5.3.4 Utilisation des énergies renouvelables

En cas de rénovation des bâtiments, il faut toujours envisager la possibilité de récupérer la chaleur sous toutes ses formes, à savoir les rejets thermiques des moteurs, l'énergie thermique produite par les installations CCF, la chaleur ambiante (pompes à chaleur) ou encore l'énergie solaire (cf. chap. 6).

Indice de dépense d'énergie de chauffage E_{ch}	Valeur effective	Valeur cible	Unité
Bâtiments administratifs aérés naturellement (locaux d'exploitation inclus)	500	350	MJ/m ² .a
Bâtiments administratifs partiellement aérés mécaniquement	575	375	MJ/m ² .a
Entrepôts et ateliers	500	300	MJ/m ² .a

Tableau 5-4
Indice de dépense d'énergie chauffage des bâtiments existants avant et après rénovation (cf. recommandation SIA 380/1)

5.3.5 La production d'eau chaude

Dans la très grande majorité des STEP, la dépense énergétique requise par la production d'eau chaude est minime, cette dernière n'étant utilisée que dans les laboratoires ainsi que pour les douches et lavabos et, dans les grandes stations, en cuisine (évent.).

La consommation d'énergie finale requise par la production d'eau chaude peut être réduite à plusieurs niveaux:

- en diminuant la consommation d'eau par la pose d'appareillage à faible consommation d'eau et de limiteurs de débit [18];
- en installant des systèmes de régulation et de commande (appareils réglant et limitant la température, etc.);
- en optimisant le rendement moyen: amélioration du rendement de production, de l'isolation thermique des installations d'accumulation et de distribution;

- en recourant aux énergies renouvelables (énergie thermique fournie par les installations CCF, énergie solaire pour le préchauffage de l'eau, etc.).

5.4 Les producteurs de chaleur classiques

La plupart des STEP sont équipées d'installations de production de chaleur classiques permettant de couvrir le besoin requis par les procédés et par le chauffage des bâtiments. Dans 75% des cas, ces installations sont alimentées uniquement par des agents énergétiques fossiles.

Leur remplacement par des installations CCF figure parmi les priorités en cas d'optimisation énergétique globale (cf. également chap. 6). Ces installations permettent en outre de réduire considérablement les coûts engendrés par l'achat d'agents énergétiques fossiles. De plus, la STEP devient plus autonome, pollue moins l'environnement et produit de l'électricité de haute valeur énergétique.

Dans les STEP produisant du gaz de digestion, les installations de production de chaleur classiques ne doivent plus être utilisées que pour couvrir les charges de pointe et en cas de panne, de révision, etc. des installations CCF, mais être dimensionnées en fonction du besoin de chaleur global et répondre aux exigences fixées par l'OPair.

Dans les STEP où le gaz de digestion n'est pas valorisé alors qu'elles sont équipées d'une installation de digestion des boues, il faut absolument procéder à une analyse sommaire afin de déterminer la production de gaz et son utilisation possible.

La recommandation SIA 380/1 précise les valeurs limites et les valeurs cibles pour le rendement moyen des installations de chauffage (production d'eau

chaude comprise). Dans les STEP, elles doivent être de 5% plus élevées, eu égard à la forte charge permanente. Pour les chaudières assurant le besoin de pointe et le relais en cas de panne, en revanche, des valeurs inférieures de 5 à 10% sont tolérées. Dans certains cantons, il convient de tenir compte également des prescriptions en matière d'incendie spécialement édictées pour les installations industrielles.

Les objectifs généraux de la recommandation SIA 380/1 n'en restent pas moins valables: le rendement des installations de chauffage doit être le plus haut possible. A cette fin, étant donné leur consommation énergétique élevée tout au long de l'année,

- les pertes de production et
- les pertes de stockage et de distribution

doivent être réduites au minimum par des mesures appropriées. Le calcul de rentabilité doit impérativement englober le renchérissement de l'énergie et de l'indice général des prix.

Remplacer de toute urgence les installations de chauffage classiques par des installations CCF dans toutes les STEP produisant du gaz de digestion.

5.5 Tableaux synoptiques des mesures à prendre

Mesures à prendre - d'urgence: Mi
- à court terme: Mct
- avec d'autres mesures: Ma

N° Mesures		voir chapitre
Mil	Isoler, les ponts de transmission de chaleur (appareillage, etc.)	5.2.2
Mi2	Remettre en état les isolations défectueuses	5.2.2
Mi3	Régler la température du digesteur à un niveau optimal	5.2.1
Mi4	Régler les chauffages d'appoint de la tuyauterie en fonction des besoins, remplacer les câbles chauffants «autorégulateurs»	5.2.3
Mct1	Isoler le digesteur et les conduites	5.2.2
Mct2	Améliorer le rendement des groupes combinés chaleur-électricité	5.2.1
Mct3	Utiliser les rejets thermiques pour la production d'eau chaude	5.3.5
Mct4	Utiliser les rejets thermiques pour le chauffage des bâtiments et le traitement des boues	5.2.1
Mct5	Elever le taux de valorisation du gaz de digestion à plus de 95%	5.2.2
Ma1	Réduire le volume des boues par un meilleur épaissement primaire	5.2.1
Ma2	Valoriser le gaz produit par la digestion des boues dans les groupes combinés chaleur-électricité de manière à produire le maximum d'énergie électrique	5.2.1
Ma3	Utiliser l'énergie thermique contenue dans les eaux usées	5.2.1
Ma4	Faire des STEP des exploitations autonomes en matière d'énergie thermique	5.1
Ma5	Utiliser les rejets thermique pour chauffer les bâtiments avoisinants	5.3

6. Utilisation des gaz de digestion, de l'énergie solaire et de l'énergie thermique contenue dans les eaux usées

	pages
6.1 Les agents énergétiques disponibles dans les STEP	151
6.2 Le gaz de digestion	152
6.2.1 Production	152
6.2.2 Le stockage du gaz de digestion	154
6.2.3 Valorisation du gaz de digestion	155
6.2.4 Les principes de la valorisation	159
6.2.5 La planification	159
6.2.6 Expériences pratiques	162
6.3 L'énergie solaire	165
6.3.1 L'énergie solaire	165
6.3.2 La valorisation de l'énergie solaire	165
6.3.3 Expériences pratiques	166
6.4 L'énergie thermique contenue dans les eaux usées	167
6.4.1 Potentiel thermique des eaux usées	167
6.4.2 Utilisation de la chaleur dégagée par les eaux usées	168
6.4.3 Expériences pratiques	169



6.1 Les agents énergétiques disponibles dans les STEP

La consommation énergétique des STEP peut être notablement réduite en exploitant:

- le gaz de digestion,
- l'énergie solaire,
- l'énergie thermique contenue dans les eaux usées,
- la force hydraulique.

Seuls les trois premiers nommés sont ici traités en détail. Pour ce qui est de la force hydraulique, nous vous renvoyons à l'ouvrage récemment publié dans le cadre du programme d'impulsion PACER [21].

L'importance de la force hydraulique, énergie potentielle récupérable à la sortie de la STEP, est très faible comparée à la consommation d'électricité totale. Le potentiel de force hydraulique peut être estimé par la formule suivante:

$$P_{el} = 8 \cdot Q \cdot H$$

Formule 6-I
Puissance électrique de la force hydraulique

P _{el}	puissance électrique de la force hydraulique	(kW)
Q	débit	(m ³ /s)
H	dénivellation utile	(m)

L'utilisation d'installations hydroélectriques n'est rentable qu'à partir de plusieurs kW, pour une dénivellation supérieure à 1-2 m et un volume important (STEP de 50 à 100 000 EH au moins).

Comparaison

En Suisse, la consommation d'électricité d'une STEP de capacité moyenne se monte à environ 170 Wh/m³ d'eaux usées (cf. chap. 2). Or, l'énergie potentielle fournie par m³ d'eaux usées et par m de dénivellation n'est que de 2 Wh, ce qui équivaut à 1% de la consommation d'électricité.

6.2 Le gaz de digestion

6.2.1 Production

Traitées par voie anaérobie mésophile, les boues dégagent du gaz de digestion à haute valeur énergétique qui peut être transformé en électricité.

La composition et le pouvoir calorifique de ce gaz varient selon les installations. Les pourcentages ci-après sont des grandeurs indicatives enregistrables dans de bonnes conditions d'exploitation. Le moindre dysfonctionnement au cours du processus de digestion – en cas de surcharge, par exemple – peut entraîner une diminution de la production spécifique de gaz.

En bonnes conditions d'exploitation donc, le gaz de digestion est composé de 60-66% de méthane et de 35-38% de dioxyde de carbone ainsi que d'une faible quantité d'azote (0,54%) et d'oxygène (< 1%). On y trouve également des traces d'hydrogène sulfuré (H_2S), de chlore et de fluor. La proportion de ces trois derniers ne doit pas dépasser un certain seuil dès lors que le gaz de digestion est utilisé pour alimenter des moteurs. C'est pourquoi le gaz doit être analysé environ cinq fois par année.

Production spécifique

La production de gaz dépend de la matière sèche organique (MSO) décomposée au cours du processus de stabilisation des boues (MSO déc.).

Valeur moyenne de gaz produit:
700 l/kg MSO déc.

S'il n'est pas possible de déterminer la quantité de MSO décomposée, la production de gaz peut également être

obtenue à partir du volume de MSO avant la phase de digestion des boues, sachant que, en temps normal, 50% de la MSO arrivant dans le digesteur y est décomposée, soit:

production de gaz:
350 l/kg MSO rapportée au volume entrant dans le digesteur

Les calculs s'effectuent sur la base des valeurs spécifiques quotidiennes suivantes:

STEP avec déphosphatation

Polluants par équivalent habitant:
total: 110 g MS/EH d
dont MSO: total: 60 g MSO/EH d

Hygiénisation avec pasteurisation et digestion des boues

Décomposition de MSO 50%
30 g MSO déc./EH d
Production spécifique de gaz 21 l/EH d

En cas de fermentation aérobie thermophile, cette valeur est réduite par la réaction exothermique, en fonction du temps de séjour des boues dans le réacteur chimique.

Pouvoir calorifique inférieur du gaz de digestion, valeur moyenne:
 $P_{ci} = 23,0 \text{ MJ/Nm}^3 (6,4 \text{ kWh/Nm}^3)$

Les valeurs spécifiques pouvant varier, il est recommandé de prendre également en compte, pour le dimensionnement définitif, les valeurs spécifiques des différents éléments, tels que les valeurs d'exploitation de l'installation, la composition du gaz déterminée par voie d'analyse, etc.

La quantité d'énergie spécifique contenue dans le gaz de digestion s'élève, compte tenu de ces différents paramètres, à 0,5 MJ par équivalent habitant raccordé et par jour.

Exploitation optimale de l'installation de digestion

Les différentes valeurs spécifiques de production énumérées ci-dessus ne peuvent être atteintes que si l'installation de digestion est exploitée de façon optimale. Les facteurs suivants sont d'une importance primordiale pour la production de gaz:

durée et température de la digestion (illustration 6-2);

brassage du contenu du digesteur: le brassage doit être complet et permanent afin que: la température soit constante, les produits résultant du métabolisme soient bien mélangés, puis éliminés, les boues ne flottent pas en surface, les substances contenues dans les boues se décomposent rapidement, le processus de digestion se déroule dans de bonnes conditions;

haute teneur en MS des boues fraîches: une élévation de la teneur en MS entraîne un accroissement de la production de gaz, car le processus de digestion dure plus longtemps (illustration 6-2);

chutes de température: une baisse de température - due à l'apport de boues froides - de 1 à 2 K seulement peut sensiblement

entraver le processus de digestion, alors que le phénomène inverse n'a aucune incidence:

- perturbations dues à une surcharge ou à la présence de substances toxiques - sont synonymes de dysfonctionnement:

un pH des boues digérées	>7
une concentration d'acide butyrique dans les boues digérées	< 500 mg/l
un pourcentage de CO ₂ dans le gaz de digestion	< 45%

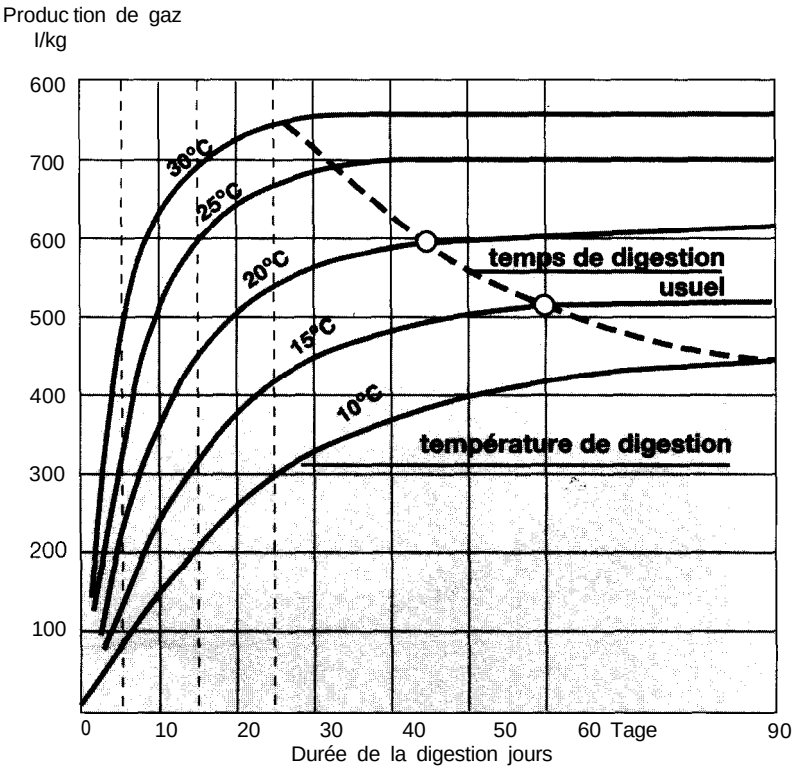


Illustration 6-2
Volume de gaz produit par 1 kg de substances organiques (décomposées) en fonction de la température et du temps de digestion (selon Faire et Moore)

6.2.2

Le stockage du gaz de digestion

Les stations d'épuration produisant du gaz de digestion sont équipées de gazomètres (humides ou secs) d'un volume équivalant à 2550% de la production quotidienne. A l'origine, ces réservoirs étaient prévus pour stocker le surplus journalier. Reste à savoir si ce volume est suffisant depuis que le gaz est valorisé.

La production de gaz au cours d'une journée variant en fonction du mode d'alimentation du digesteur: elle augmente de façon rapide et massive, si les boues fraîches y sont introduites en une seule fois. En quelques heures, la valeur de pointe atteint jusqu'à 150% de la production moyenne (illustration 6-3). La compensation de cette pointe nécessite

un volume de stockage égal à 15-20% de la production journalière.

Si, en revanche, le digesteur est alimenté par plusieurs charges réparties sur 24 heures, comme les installations d'hygiénisation, le gaz de digestion est produit en continu. Il y a certes quand même des variations mais, dans la majorité des cas, un volume de stockage d'environ 10% de la production quotidienne est alors suffisant.

Les réservoirs permettent également de stocker le gaz une fois valorisé lorsque la quantité de ce dernier varie, que ce soit en fonction du besoin d'énergie thermique requis par le volume des boues ou le chauffage des bâtiments, ou parce que les installations CCF tournent en période de tarif élevé. Le volume de stockage requis se situe alors entre 15 et 25% de la production quotidienne.

Le volume des réservoirs existants est donc suffisant pour stocker le gaz produit et valorisé durant une journée, voire une semaine au maximum. En cas d'accroissement saisonnier important de la production de gaz, dû notamment aux exploitations industrielles rurales (traitement des fruits et des légumes), le surplus peut être absorbé en augmentant la puissance des installations de valorisation.

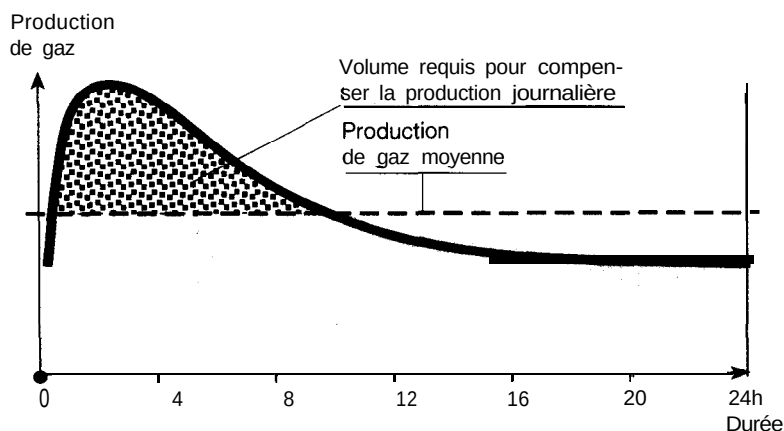


Illustration 6-3
Production de gaz en cas d'alimentation du digesteur en une seule fois (courbe selon Pöpel) [33]

6.2.3
Valorisation du gaz
de digestion

Utilisation par les installations de
couplage chaleur-force (CCF)

- Transformation d'énergie thermique
en électricité

Dans une installation CCF, le gaz de digestion entraîne un moteur qui transforme une part de l'énergie en énergie mécanique qui, à son tour, actionne un générateur pour produire du courant ou un appareil (un compresseur, p. ex.). Le reste, provenant du refroidissement des effluents gazeux et des moteurs, est converti en énergie thermique (illustration 6-4). Le rendement total d'une installation CCF récente est de l'ordre de 90%, dont environ 35% sous forme d'électricité.

Ces proportions varient en fonction de la technique de fabrication et du modèle. Autres critères à prendre en compte avant d'opter pour l'une ou l'autre installation CCF: le fait que l'énergie mécanique est une forme d'énergie de plus haute valeur que l'énergie thermique et le fait que le prix de l'électricité est plus élevé que celui de l'énergie thermique. L'introduction du tarif été/hiver accentue encore l'écart en faveur de l'électricité (cf. chap. 7.4).

Les moteurs à gaz étant placés dans des caissons antibruit, la chaleur de rayonnement doit en être évacuée. Bien que peu énergétique, elle peut néanmoins être récupérée et utilisée à des fins spécifiques.

Valorisé dans sa totalité, le gaz de digestion produit un tiers d'énergie thermique de moins que sa combustion dans une chaudière, mais cela suffit

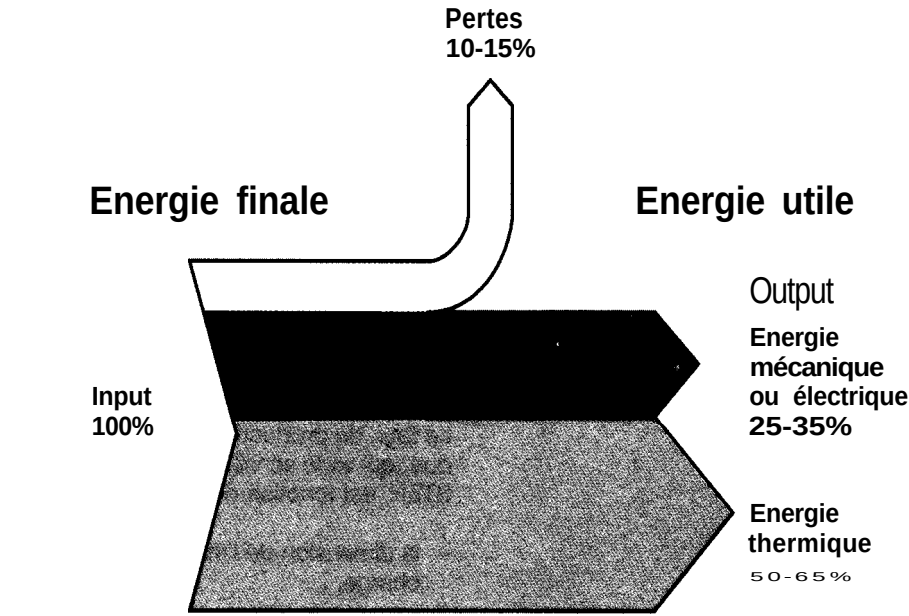


Illustration 6-4
Flux énergétique dans une installation de couplage chaleur-force

pour couvrir l'entier des besoins thermiques des STEP à partir de 15 000 EH. Pour les STEP de plus petite capacité (à partir de 5 000 EH environ), l'utilisation d'installations CCF se justifie cependant aussi, car l'énergie thermique qu'elles fournissent permet de couvrir le besoin requis par le traitement des boues à longueur d'année.

Dans les STEP de plus de 10 000 EH, valoriser la totalité de gaz de digestion dans des installations CCF.

Le taux de production d'énergie thermique, qui varie sensiblement selon les STEP, est fonction de plusieurs facteurs:

- la dimension de l'installation et sa charge,
- les composantes de l'installation de traitement des boues,
- le degré d'isolation du digesteur,
- le degré d'isolation des bâtiments à chauffer (locaux d'exploitation, locaux où se déroule le traitement des boues, protection contre le gel de certaines installations annexes telles que dégrilleurs, pompes, etc.).

Le besoin de puissance thermique et la consommation annuelle d'énergie thermique sont déterminés conformément aux recommandations SIA 384/2 et 380/1 après analyse de jours typiques d'exploitation hivernale et estivale et de périodes intermédiaires.

L'objectif des installations CCF étant de valoriser la totalité du gaz de digestion, elles doivent être équipées d'un système de refroidissement alimenté par de l'eau industrielle ou de l'air afin d'évacuer le surplus d'énergie thermique temporaire (en été).

Domaines d'application des installations CCF

Solution A: groupe combiné chaleur-électricité

Le principe de ce système, construit en série, consiste à alimenter un moteur avec du gaz de digestion, ce moteur entraînant un générateur qui produit de l'électricité. Ce type d'installations a sur la solution B l'avantage de produire du courant indépendamment du besoin en énergie mécanique de l'une ou l'autre composante. Ce courant alimente le réseau interne et couvre le besoin de la STEP. Les surplus éventuels sont dirigés sur le réseau public. Exploité 24 heures sur 24 en fonction de la production de gaz - ce qui requiert un système de régulation de la puissance -, le groupe combiné chaleur-électricité permet d'en valoriser la totalité.

Objectifs:

Transformer en électricité tout le gaz de digestion produit

Pour réaliser le premier de ces objectifs, il convient d'équiper l'installation d'un système de commande programmable en fonction du besoin de puissance thermique. Si l'électricité provient du réseau public au tarif tenant compte de la puissance fournie, l'entretien du moteur à gaz (vidange) doit être effectué durant les périodes à faible besoin d'énergie ou sans mesure de la puis-

sance fournie (selon la qualité du gaz de digestion, les moteurs doivent être vidangés toutes les 500 à 1000 heures ou, en cas d'exploitation continue, tous les 20 à 40 jours).

Il est recommandé d'installer plusieurs groupes combinés afin de faire face, en temps voulu, à l'accroissement de charge et, partant, de la production de gaz. Lorsque cette dernière est normale, il est toujours possible de se déconnecter du réseau public pour éviter de payer le tarif de pointe.

L'achat de plusieurs groupes accroît le montant des investissements de 20 à 60% selon leur dimension. Pour les STEP de moins de 30 000 EH, on optera ou non pour cette solution selon que la réduction de la pointe de puissance en provenance du réseau (entre autres facteurs) joue un rôle important ou non.

Solution B: entraînement direct de la soufflante (traitement biologique)

A la différence de la première solution, le moteur à gaz entraîne ici directement la soufflante destinée à l'apport d'air dans les bassins à boues activées. En cas d'entraînement du compresseur principal, la durée d'exploitation couvre toute l'année. La puissance de la soufflante doit être réglée en fonction de la charge minimale nocturne ou de la puissance minimale nécessaire pour éviter la décantation des boues et pouvoir être abaissée en cas de charge minimale. Il convient donc d'équiper le moteur de la soufflante d'un système réglant la vitesse de rotation. Les travaux d'entre-

tien (vidange, etc.) doivent, ici aussi, être effectués durant les périodes de basse puissance (électricité) ou les heures à tarif modéré.

Le rendement électrique moyen est de 2% plus élevé que celui des groupes combinés (pas de pertes des générateurs). L'entraînement direct est par contre plus coûteux, tant à l'achat qu'à l'entretien. Un calcul de rentabilité permet de désigner la solution la plus avantageuse de cas en cas.

Solution C: combinaison des deux systèmes

Une combinaison des solutions A et B peut présenter des avantages dans les STEP de grande capacité.

Solution D: groupe électrogène de secours

Le groupe combiné chaleur-électricité peut être utilisé comme génératrice de secours pour des fonctions bien précises. En pareil cas, les aspects techniques doivent être définis avec l'entreprise d'électricité compétente.

Utilisation du gaz de digestion
Installations CCF: valorisation maximale
Combustion: uniquement pour les charges de pointe
Élimination par torchère: à éviter

Le gaz de digestion comme combustible

La combinaison du gaz de digestion avec de l'huile de chauffage était encore chose courante il y a quelques d'années. La chaleur était produite, directement, par l'intermédiaire de trois types de chaudières.

Chaudière avec brûleur bicomcombustible gaz de digestion/huile de chauffage

Solution A: chaudière valorisant le gaz de digestion

Le gaz était utilisé comme agent énergétique en fonction du besoin thermique de la STEP dans des installations à une, deux ou plusieurs chaudières. En cas de rénovation, de remplacement ou d'agrandissement, ce système devrait être abandonné au profit de la solution B, ne serait-ce que parce que, dans les STEP de plus de 10 000 EH, le besoin d'énergie thermique est de toute manière inférieur à l'offre obtenue par combustion directe.

Solution B: combinaison installation CCF/chaudière pour couvrir les besoins thermiques de pointe

Le besoin thermique de base est couvert par une installation CCF. La chaudière prend le relais en cas de panne ou assure le complément, en cas de pointe notamment, durant les mois d'hiver où la température des boues est au plus bas.

La chaudière doit être dimensionnée de façon à fournir la puissance thermique totale en cas de panne ou d'entretien de l'installation CCF, particulièrement lorsque l'énergie thermique est indispensable au bon déroulement d'un procédé comme l'hygiénisation.

Solution C: chaudière à vapeur à basse pression

Ce système, dont le principe consistait à insuffler de la vapeur dans le digesteur pour en chauffer le contenu, la plupart du temps combiné avec une chaudière à eau chaude, a de moins en moins cours, surtout lorsque les STEP sont équipées d'une installation d'hygiénisation.

Que les chaudières soient exploitées selon la solution A ou B, elles doivent être conçues conformément aux recommandations SIA relatives aux producteurs d'énergie thermique et selon les dispositions légales en vigueur (OPair 92, ordonnances cantonales en matière d'isolation thermique).

Élimination du gaz de digestion par des torchères

Si les STEP doivent être équipées de manière à valoriser la totalité du gaz de digestion (OPair, émissions de CO₂ et de méthane), il ne saurait être question de supprimer les torchères, car il faut pouvoir éliminer le gaz en cas de panne de l'installation CCF, par exemple. Rappelons en effet que, pour des raisons de rentabilité (coût-efficacité), la capacité des gazomètres ne dépasse pas 25 à 50% de la production journalière moyenne.

6.2.4

Les principes de la valorisation

D'une façon générale, la valorisation du gaz de digestion devrait répondre à quelques principes éprouvés, à savoir:

- transformer en priorité le gaz de digestion en électricité;
- le valoriser de préférence par l'intermédiaire d'un groupe combiné chaleur-force:

dimensionner ce groupe de manière à couvrir le besoin thermique de base tout au long de l'année;

installer une chaudière bicomcombustible (gaz de digestion/huile de chauffage) pour couvrir le besoin thermique de pointe;

dimensionner la chaudière en fonction du besoin total de puissance thermique (en cas de panne);

- prévoir - éventuellement - plusieurs groupes combinés ou leur adjoindre un moteur à gaz à entraînement direct dans les STEP de moyenne à grande capacité;
- installer un système de refroidissement (air ou eau) pour la transformation du gaz en électricité durant l'été;
- envisager la possibilité d'utiliser le groupe combiné comme génératrice de secours.

6.2.5

La planification

Resoin thermique

Le besoin thermique doit être déterminé en fonction des différentes puissances requises (chaleur de procédé, chauffage des bâtiments), mais aussi en fonction de l'étalement du besoin dans le temps (cf. chap. 5, ill. 5-I). Les recommandations SIA 384/2 et 380/1 sont à cet égard fort utiles.

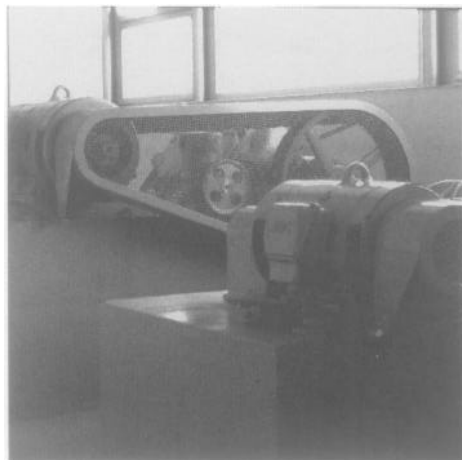
Consommation d'électricité

La consommation d'électricité (puissance et travail) doit, elle aussi, être déterminée avec précision, en se fondant sur le cahier des charges (cf. annexe A5).

Les variations saisonnières, d'origine industrielle notamment (traitement des légumes, etc.), et les techniques de procédé doivent être prises en compte.

Qualité du gaz de digestion

La qualité du gaz de digestion est primordiale pour le bon fonctionnement des installations CCF. Dans l'idéal, il devrait faire l'objet de cinq analyses par année. Outre les valeurs usuelles telles que le pouvoir calorifique et la teneur en méthane et en dioxyde de carbone, il faut également calculer la quantité des éléments traces (hydrogène sulfuré, chlore et fluor) qui ne doit pas dépasser une certaine limite. Les résultats de ces analyses doivent être communiqués aux fournisseurs.



Production de gaz

Les installations CCF doivent être dimensionnées en fonction de l'évolution de la production de gaz au cours de la durée de vie de l'installation CCF.

Sont dans cette optique déterminantes:

- la charge de la STEP au moment de sa mise en service et à la fin de la durée de vie de l'installation CCF,
- les améliorations prévues dans le domaine du traitement des eaux et des boues,
- l'évolution probable dans le secteur industriel: accroissement ou réduction du volume d'eaux usées,

Les données d'exploitation existantes ajoutées à ces estimations permettent d'évaluer la production de gaz journalière.

$Q_{\min}$ quantités journalières minimales de gaz produit au moment de la mise en service et au terme de la durée d'utilisation de l'installation CCF

$Q_{\max}$ dito, pour les quantités journalières maximales

Dimensionnement des groupes combinés chaleur-électricité et des installations CCF

Pour que le gaz de digestion soit valorisé dans sa totalité , il convient:

- en cas de valorisation par une seule installation CCF, de se fonder sur les valeurs journalières $Q_{\min}$ et $Q_{\max}$ et de régler la plage de puissance en conséquence;

- en cas de valorisation par deux ou plusieurs unités, de veiller à ce que leur puissance corresponde à un débit de gaz d'au moins 120% du débit maximum, afin d'absorber les éventuelles pointes de production;

- de viser un degré de production maximal, tant en électricité qu'en énergie thermique (cf. chap. 7.5).

Choix de l'emplacement

Pour déterminer l'emplacement des groupes combinés chaleur-électricité, plusieurs facteurs entrent en ligne de compte:

- *protection contre le bruit*
les groupes combinés doivent être confinés;
- *aération*
l'apport d'air de comburant et le refroidissement des moteurs (chaleur de rayonnement) nécessitent la pose d'installations d'amenée et d'évacuation d'air, dont les émissions sonores doivent être limitées;
- *cheminée d'évacuation des effluents gazeux*
envisager la possibilité de convertir les canaux de cheminée non utilisés;

connexion électrique

réfrigérant
prévoir éventuellement une amenée
spéciale pour le fluide de refroidisse-
ment

raccordement au système d'alimen-
ta tion thermique existant

Calcul du rapport coût-efficacité

Le calcul de rentabilité est décrit en détail au chapitre 7.4.2. Pour ce qui est des installations CCF, sont à considérer en particulier:

la durée de vie en fonction du type de moteur:	
- moteur de voiture automobile (petites installations):	15 - 20 000 h ou 3 ans maximum
- moteur industriel:	100 000 h ou 12,5 ans maximum
les frais d'entretien:	
local:	1,5% des investissements par année
machines:	moteur industriel: 3 à 4 ct/kWh _e d'électricité pro- duite (demander un contrat d'entretien) moteur d'automobile: env. 5 ct/kWh _e
service et entretien par le personnel de la STEP:	
env. 50 heures par année et par installation	
coût de l'électricité au tarif du réseau public	
prix moyen (1993)	14 ct/kWh
facteur de correction moyen pour le renchérissement de l'énergie (12,5 a, 5%)	1,4
prix moyen d'ici quelques années	20 ct/kWh
coût des combustibles (à l'exclusion du gaz de digestion):	
prix du marché	

6.2.6

Expériences pratiques

Outre les résultats concrets enregistrés dans les STEP équipées d'installations CCF, il existe bon nombre de données recueillies par le groupe de travail mandaté par Energie 2000 pour étudier les énergies renouvelables.

Les effluents gazeux

Le fonctionnement des installations CCF valorisant le gaz de digestion est comparable à celui des moteurs alimentés par du gaz naturel, mais les premières émettent des effluents gazeux. Cela étant, pour respecter les prescriptions de l'OPair 85, renforcée en 1992, elles doivent être équipées de systèmes d'épuration. Dans un premier temps, cette opération fut effectuée au moyen d'un catalyseur à trois voies, mais on s'est aperçu récemment que les substances polluantes contenues dans le gaz de digestion (hydrogène sulfuré, chlore, fluor et, probablement, d'autres éléments non encore identifiés) pouvaient réduire notablement la durée de vie du système. L'avis des fabricants quant à la teneur admissible de ces substances étant tout sauf unanime, il vaut mieux opter pour le moteur à mélange pauvre, dont les valeurs d'émissions obtenues au banc d'essai répondent aux prescriptions de l'OPair. Néanmoins, les valeurs des régions soumises à des mesures spéciales ne peuvent, par l'instant, par être respectées avec un moteur à mélange pauvre, il en est encore au stade de la mise au point. Il convient donc pour l'heure de consulter le service cantonal d'hygiène de l'air ou de protection de l'environnement afin de s'assurer que le moteur peut être utilisé.

Les installations CCF permettent d'amener l'eau à une température de 80-85°C (chaleur utile), ce qui est suffisant pour chauffer le digesteur et les bâtiments.

Pour ce qui est de l'énergie thermique requise par une installation d'hygiénisation des boues, il convient de bien analyser la situation. En effet, les échangeurs de chaleur eaux/boues des installations d'hygiénisation existantes ont souvent été dimensionnés sur la base d'une température supérieure à celle que permet d'atteindre une installation CCF. Si ces échangeurs thermiques n'ont pas de réserves, il peut arriver, selon les conditions d'exploitation, que l'apport de chaleur dans le système ne soit plus suffisant. Cela étant, les nouvelles installations d'hygiénisation devraient être dimensionnées pour des températures inférieures à 80°C.

Service et entretien

Les travaux de service et d'entretien requis par les installations CCF sont très clairement définis par le fabricant, en fonction du nombre d'heures d'exploitation. Les indications doivent être suivies à la lettre pour que l'installation atteigne la durée de vie prévue. Des contrats peuvent être passés avec le fournisseur pour tout ou partie des travaux. Selon la dimension de l'installation et la proportion de prestations fournies par le fournisseur, les frais d'entretien se montent, pour des moteurs industriels, à 3-4 ct/kWh, (électricité produite). Cela revient bien évidemment plus cher que si tous les travaux sont effectués par des employés de la STEP, mais un contrat en garantit la ponctualité.

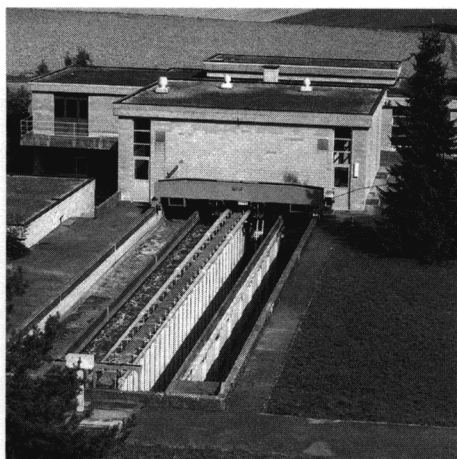
	Unité	PRESCRIPTIONS			MOTEUR À GAZ		
		OPair 85	OPair 92	Région soumise à un plan de mesures ¹⁾	sans lavage des fumées	Catalyseur trois voies	Moteur à mélange pauvre
Consommation de combustibles	kg/h	≥50	210	≥10			
Polluant		Valeur de référence Teneur en O ₂ des effluents gazeux: 5% de V					
Particules solides	mg / m ³	≤ 100	≤ 100		pas de problèmes		
CO	mg / m ³	≤ 650	≤ 650		~ 650 ³⁾	650	650
NO _x	mg / m ³	≤ 400	≤ 400	≤ 70	~ 4000 ³⁾	70	150-400 ²⁾
1) exemple: les cantons de Bâle-Ville et Bâle-Campagne ont édicté des valeurs plus élevées que celles de l'OPair 92 2) valeurs obtenues au banc d'essai, variables selon le fabricant 3) très variable en fonction de l'excès d'air 4) rarement approprié pour le gaz de digestion							

Tableau 6-5
Effluents gazeux émis par les moteurs à gaz de digestion: comparaison entre les valeurs d'émissions prescrites par l'OPair et les valeurs effectives (1993)

Rentabilité

En valorisant la totalité du gaz de digestion et en utilisant des installations CCF à puissance réglable, ces dernières fonctionnent environ 8 000 h par année, contre 4 000 à 5 000 seulement pour les installations CCF classiques fonctionnant au gaz naturel. Or, plus le nombre d'heures d'exploitation est élevé, plus le système est rentable.

Exploitées dans des conditions optimales, même les installations CCF de faible puissance - de 15 à 20 kW, - sont rentables dans une STEP de 10 à 15000EH.



Exemple: STEP de 30 000 EH (réalisation en cours)

Cette station d'épuration sera équipée d'une installation de filtration-floculation, d'une installation d'hygiénisation par voie aérobie thermophile et d'une installation de déshydratation partielle. Partiellement aérée par voie mécanique, l'air vicié sera épuré par un biofiltre, et la totalité du gaz de digestion sera valorisé par le biais de deux petits groupes combines chaleur-électricité (2 x 35 kW_e).

Taux de production prévu:

électricité produite par les deux groupes traitement des boues avec hygiénisation aérobie thermophile:	43%
traitement des boues sans hygiénisation aérobie thermophile:	57%

énergie thermique fournie par les deux groupes:	> 95% (parfois en excès)
---	--------------------------

Exemple: STEP de 14 000 EH (en exploitation)

L'épuration se déroule en deux étapes, avec traitement des boues, sans hygiénisation. La totalité du gaz de digestion est valorisée par un petit groupe combiné chaleur-électricité (25 kW_e).

Taux de production:

électricité produite par le groupe:	30% en moyenne
énergie thermique fournie par le groupe:	95% (parfois en excès)

6.3 L'énergie solaire

6.3.1 L'énergie solaire

Sur le Plateau suisse, le soleil diffuse une quantité d'énergie annuelle proche de 4 MJ par m² de surface horizontale (1 100 kWh/m² a), composée de rayonnement direct et indirect (diffus). Les valeurs locales précises peuvent être obtenues auprès de l'office fédéral de l'énergie [61]. En Suisse, la proportion de rayonnement diffus par réflexion du ciel se monte à plus de 50%.

Utilisation possible dans les STEP

Parmi les nombreuses composantes des STEP, il en est plusieurs qui génèrent des émissions (odeurs, bruit). Afin de pallier cet inconvénient, il est de plus en plus fréquent que, profitant d'une rénovation ou d'un agrandissement, on recouvre les éléments concernés. Ceux-ci deviennent alors de grandes surfaces horizontales qui, selon leur exposition, se prêtent particulièrement bien à la pose d'installations solaires. Les STEP étant situées dans des zones industrielles, les problèmes esthétiques rencontrés dans les quartiers d'habitation ne se posent pas.

Les installations photovoltaïques permettent de transformer le rayonnement global en énergie électrique. Elles contribuent, aux côtés des autres sources d'énergies renouvelables, à couvrir 0,5% de la consommation, et répondent en cela aux objectifs fixés par Energie 2000.

Les capteurs solaires thermiques, en revanche, entrent en ligne de compte uniquement lorsque la quantité requise pour chauffer les boues ou l'eau en été est insuffisante. Ils peuvent fournir jusqu'à 2 GJ/m² a (550 kWh/m² a) d'énergie thermique brute.

6.3.2 La valorisation de l'énergie solaire

Production d'électricité

L'installation photovoltaïque est composée d'un disque semi-conducteur, appelé cellule solaire, qui génère de la tension (effet photovoltaïque) lorsqu'il est exposé à la lumière. Il suffit de raccorder un consommateur électrique à la cellule pour que le courant passe. La puissance est fonction de l'intensité de la lumière incidente et de la grandeur de la cellule. Le courant continu ainsi produit peut être utilisé directement dans des installations à courant continu, mais il est le plus souvent converti en courant alternatif 220V/380V et dirigé dans le réseau interne ou public.

Se prêtent à la pose d'installations photovoltaïques toutes les surfaces horizontales et verticales orientées au sud. Celles-ci étant en nombre amplement suffisant (toits plats, couvertures de bassins, actuelles et futures), il convient de renoncer aux zones régulièrement ou temporairement ombragées situées à proximité d'immeubles, de collines, de plans inclinés, de ponts, etc. On veillera bien sûr à calculer très précisément le rendement de ces installations en fonction de leurs spécificités.

La technique photovoltaïque est en perpétuelle évolution. Les chercheurs se penchent en particulier sur le développement de cellules à plus haut rendement (actuellement situé entre 5 et 12%) et à moindre coût.

Des informations détaillées peuvent être obtenues en lisant les dernières publications parues sur le sujet [62].

Poser des installations photovoltaïques sur toutes les surfaces disponibles (coûts encore très élevés).

Utilisation à des fins thermiques

Lorsque la production de gaz de digestion des STEP est nulle ou trop faible, les capteurs solaires peuvent fournir un apport thermique non négligeable, car ces STEP sont le plus souvent chauffées au moyen de combustibles fossiles ou d'électricité. Les capteurs solaires ne peuvent par contre que rarement contribuer à couvrir le besoin thermique requis par le traitement des boues, car les installations de chauffage des boues sont dimensionnées pour des températures de 80 à 90°C (préchauffage) et leur adaptation au niveau inférieur que fournissent les capteurs solaires serait très coûteuse.

STEP de 30 000 EH équipée d'installations photovoltaïques

Surface totale des panneaux solaires	1 500 m ²
Puissance (p = peak)	240 kWp
Rendement électrique annuel	254 000 kWh/a
Part de la consommation totale d'électricité	22%
Coût estimatif (1991)	4,5 millions de francs
Prix de revient de l'électricité (6%, 20 a)	1,50 fr./kWh

Tableau 6-6

Quantité d'électricité produite par des installations photovoltaïques dans une STEP de 30 000 EH dont tous les bassins sont couverts [63]

6.3.3

Expériences pratiques

En Suisse, plus de 500 installations photovoltaïques d'une puissance totale de 3,3 MW (janvier 1993) sont en service. **Sur la base des expériences réalisées, on peut affirmer que**

- la technique est aujourd'hui fiable;
- la sécurité des installations est garantie si elles ont été planifiées et posées par des spécialistes;
- le prix de revient en conditions favorables se situe entre 1.20 et 1.50 franc/kWh d'électricité [63];
- le rendement et le prix de revient spécifique vont être améliorés et, partant, la rentabilité va augmenter.

Une étude récente a analysé les possibilités et les limites d'utilisation d'installations photovoltaïques dans une STEP de 30 000 EH [63]. En cas d'utilisation totale des surfaces disponibles (bassins couverts), un cinquième environ de la consommation d'électricité pourrait être couvert par l'énergie solaire (tableau 6-6). Les coûts sont toutefois considérables.

6.4 L'énergie thermique contenue dans les eaux usées

6.4.1 Potentiel thermique des eaux usées

De par leur volume, les eaux usées dégagent beaucoup d'énergie thermique qui peut être extraite au moyen de pompes à chaleur, amenée à une température plus élevée et utilisée à des fins de chauffage.

Les eaux usées présentent des caractéristiques plus intéressantes que les autres milieux où peuvent être employées les pompes à chaleur (air, eaux souterraines, eaux de lacs et de ruisseaux, sol). En effet, leur température se situe entre 10 et 15°C - même en hiver -, ce qui permet un excellent rendement.

En théorie, l'énergie thermique contenue dans les eaux usées permet de couvrir non seulement le besoin thermique total d'une STEP, mais aussi celui de, près d'un cinquième des bâtiments raccordés. Le problème n'est donc non pas du côté de l'offre, mais du côté des consommateurs. Pour obtenir une première évaluation de l'offre thermique, il suffit de se fonder sur

l'offre de puissance thermique totale:
 $q = \text{env. } 1 \text{ kW par habitant raccordé}$

Cette valeur est basée sur les paramètres suivants:

- Arrivée d'eaux usées par habitant raccordé (valeur moyenne suisse, eaux de pluie et eaux claires parasites incluses)	300 m³/a
- Part utilisable à des fins thermiques (charge de base)	50% env.
- Température moyenne des eaux usées en hiver	+ 12°C
- Refroidissement des eaux usées admissible à	+ 3°C
- Puissance thermique tot./puissance thermique contenue dans les eaux usées.	5

• Puissance thermique totale = puissance thermique des pompes à chaleur (moteur à explosion) + chaudière de pointe

Il n'est donc pas nécessaire de déterminer plus précisément l'offre d'énergie thermique pour ce qui est de l'utilisation interne à la STEP. Quant à l'offre disponible pour une utilisation externe de plus grande ampleur, elle peut être calculée d'après la marche à suivre décrite sous [9], en prenant en compte les dispositions légales en matière de déversement des eaux usées dans l'exutoire et, plus précisément, sur le refroidissement toléré.

6.4.2

Utilisation de la chaleur contenue dans les eaux usées

L'énergie thermique contenue dans les eaux usées ne peut que rarement être utilisée pour couvrir un besoin interne au STEP. Les possibilités d'utilisation sont assez semblables à celles évoquées pour l'énergie solaire (cf. chap. 6.3.2). En revanche, eu égard à l'énorme potentiel utilisable à l'extérieur, il vaut la peine d'aborder ici brièvement le sujet.

L'énergie thermique est prélevée des eaux usées à leur sortie de la STEP, afin que l'exploitation de cette dernière ne soit pas entravée par leur refroidissement. L'extraction se fait au moyen d'échangeurs de chaleur, puis l'énergie thermique est transportée par des fluides caloporteurs jusqu'à la pompe à chaleur située dans la centrale de chauffe. Selon la qualité des eaux usées, ce transport d'énergie thermique est effectué en circuit ouvert avec des eaux usées épurées ou en circuit fermé avec de l'eau propre. A cette fin, on peut utiliser des conduites normales, enfouies à 1 mètre de profondeur environ. Il n'est pas nécessaire de les isoler, car les pertes thermiques sont globalement faibles sur la période de chauffage [9]. La centrale de chauffe, composée d'une pompe à chaleur et d'une chaudière pour couvrir le besoin de pointe, doit être située le plus près possible des consommateurs, car les conduites d'eau froide coûtent moins cher (pas d'isolation). La pompe à chaleur est dimensionnée en fonction de la charge de base (env. 50 à 70% du besoin de puissance thermique total). Quant à la chaudière, elle doit pouvoir couvrir l'entier de ce besoin en cas de panne de la pompe à chaleur ou du système d'apport de chaleur, et être alimentée, de préférence, par un agent

énergétique stockable (le mazout, p. ex.). La centrale de chauffe peut alimenter plusieurs bâtiments par le biais d'un réseau de distribution de chaleur.

6.4.3

Expériences pratiques

Il existe en Suisse près d'une douzaine d'installations utilisant l'énergie thermique des eaux usées pour alimenter un ou plusieurs bâtiments à l'extérieur de la STEP. Sur la base d'un sondage effectué en 1985 auprès des exploitants ainsi que d'enquêtes et études préliminaires plus récentes réalisées dans le cadre du programme Energie 2000, la situation peut être résumée comme suit:

Au niveau de l'exploitation

Quelques problèmes isolés ont été enregistrés dans ces installations pionnières, ce qui était bien évidemment à prévoir. La plupart des exploitants se déclarent cependant satisfaits du fonctionnement de leurs installations, dont la plus ancienne a été mise en service il y a 18 ans déjà.

Au niveau de la rentabilité

Sur la base des données fournies par les exploitants, les installations s'avèrent rentables dans presque tous les cas, compte tenu des conditions générales de l'époque (prix du pétrole: 60 à 70 francs par 100 kg, intérêts: 4 à 5%).

Les conditions économiques s'étant passablement modifiées ces dernières années (prix du pétrole: 40 francs par 100 kg, intérêts: 7%) il ne s'est quasiment plus construit d'installations de ce type. Un programme d'action consacré aux énergies renouvelables a été lancé dans le cadre d'Energie 2000 afin d'étudier comment surmonter les obstacles (conditions économiques, financement des investissements, etc.). Il conviendrait notamment d'envisager que les communes (Services industriels) exploi-

tent le réseau externe de distribution de chaleur à leur compte et que les coûts supplémentaires soient financés par les taxes d'épuration (cf. chap. 7.3.4).

Procéder à une analyse sommaire afin d'examiner la possibilité d'une utilisation externe de l'énergie thermique dans toutes les STEP à partir de 5 à 10000 EH se trouvant dans un rayon de 1 à 2 km de centrales de chauffe importantes (au-dessus de 1 MW) (renseignements: Office fédéral de l'énergie, Énergie 2000, Programme d'action «Énergies renouvelables»)),



7. Instruments de travail

7.1	Introduction	172
7.1.1	Buts et principes de l'optimisation énergétique	172
7.1.2	Responsabilités du maître de l'ouvrage	173
7.1.3	Le choix des spécialistes	174
7.1.4	Les étapes de l'optimisation énergétique	175
7.2	L'analyse sommaire	177
7.2.1	Objectif	177
7.2.2	Déroulement	177
7.2.3	Rapport	179
7.2.4	Coût et plan de travail	179
7.3	L'analyse détaillée	180
7.3.1	But et exigences	180
7.3.2	Déroulement	181
7.3.3	Coût et plan de travail	188
7.3.4	Le financement	189
7.4	Le cahier des charges et le calcul de rentabilité	190
7.4.1	Le cahier des charges	190
7.4.2	Le calcul de rentabilité	192
7.5	Les critères d'évaluation énergétique	198
7.5.1	Objectif et méthode	196
7.5.2	L'évaluation sommaire	196
7.5.3	L'évaluation détaillée	199
	INSTALLATION À BOUES ACTIVÉES	203

7.1 Introduction

7.1.1

Buts et principes de l'optimisation énergétique

Sur la base des connaissances techniques acquises à la lecture des chapitres précédents, il est temps d'en venir à la marche à suivre et aux instruments de travail existants pour optimiser efficacement une station d'épuration.

Vue d'ensemble

Les mesures d'économie d'énergie doivent être examinées de façon globale, puis mises en œuvre selon une planification systématique regroupant l'ensemble de ces mesures. En effet, si les mesures énergétiques sont planifiées isolément et non globalement - seulement au moment où un appareil est défectueux ou doit être remplacé rapidement pour une raison ou pour une autre -, cela présente des inconvénients considérables.

Avantages de la globalisation:

- le potentiel d'économies réalisables tout en maintenant la rentabilité de l'exploitation peut être totalement exploité;
- les coûts énergétiques peuvent être réduits au minimum;
- les investissements consentis pour la totalité des mesures énergétiques sont dans l'ensemble inférieurs à la somme des coûts engendrés par la mise en œuvre de mesures isolées;
- le temps et les efforts consacrés par le maître de l'ouvrage, l'exploitant et son personnel pour le suivi du projet, la construction et la mise en service sont moindres;
- les éventuels arrêts d'exploitation sont plus courts.

Collaboration pluridisciplinaire

Les différents domaines liés à la consommation d'énergie sont interdépendants. Ainsi, le besoin d'électricité requis pour l'installation à boues activées influe sur le dimensionnement de l'installation de couplage chaleur-force (CCP); inversement, le dimensionnement de cette dernière influe sur le degré d'isolation du digesteur. Ces deux exemples suffisent à prouver que, dans le domaine énergétique, il n'est jamais possible d'optimiser un seul élément ou plusieurs pris isolément, tant les procédés d'une STEP sont en interaction. Il faut donc absolument rénover tous les consommateurs et producteurs d'énergie globalement.

Ordre de priorité des mesures

Lors de la planification, puis de l'optimisation énergétique, il y a lieu de fixer des priorités et de respecter l'ordre suivant: outre l'optimisation énergétique dans les domaines électricité / énergie thermique / production d'énergie, les mesures d'économie d'énergie doivent bien évidemment aussi être évaluées du point de vue des procédés utilisés pour traiter les eaux usées et les boues.

But de l'optimisation énergétique: économiser le maximum d'énergie en prenant des mesures, dans le domaine de l'électricité surtout.

Priorités	Mesures
1	Réduire le besoin énergétique par le biais de mesures d'économie
2	Récupérer les rejets de chaleur
3	Utiliser les agents énergétiques renouvelables produits par la STEP pour couvrir le besoin énergétique résiduel
4	Employer efficacement l'énergie externe

Tableau 7-1
Planification et optimisation énergétique: liste des priorités

7.1.2 Responsabilités du maître de l'ouvrage

Il incombe au maître de l'ouvrage de lancer et de financer les différentes étapes d'une optimisation énergétique.

- Décision de principe:
Atteindre les objectifs fixés par Énergie 2000.
- Étapes nécessaires:
Mettre en oeuvre au minimum toutes les mesures d'économie d'énergie rentables pour l'exploitation de la STEP (en tenant compte du renchérissement de l'énergie).

Afin que ces objectifs soient atteints le plus rapidement et le plus efficacement possible, il convient de procéder de façon systématique. Une manière de faire qui s'est déjà avérée efficace dans la pratique est développée ci-après.

L'exploitant de la STEP joue un rôle décisif dans le déroulement général des opérations. Il connaît l'installation, ses

aspects positifs et négatifs. Il est donc le plus souvent l'élément moteur, car c'est lui qui peut rendre attentif à l'urgence et aux avantages d'une optimisation énergétique. C'est à lui de convaincre les pouvoirs publics de la nécessité d'agir.

La première étape de toute optimisation énergétique consiste à effectuer une analyse sommaire. Le maître de l'ouvrage doit pour ce faire mandater des spécialistes qui lui donneront une première vue d'ensemble de la situation énergétique de la STEP et établiront une recommandation sur la base de laquelle il donnera alors éventuellement mandat pour une analyse détaillée.

En cas d'agrandissement, de transformation ou de rénovation de composantes importantes de la STEP déjà prévus, il n'est pas nécessaire de procéder à une analyse sommaire: il faut passer directement à l'analyse détaillée.

Celle-ci met en évidence les mesures d'économie d'énergie concrètes et leurs coûts respectifs et fournit au maître de

Personnage clé de toute analyse et rénovation énergétique: le maître de l'ouvrage, auquel il appartient de fixer les objectifs énergétiques pour les constructions et installations communales.

Constituer une équipe pluridisciplinaire, dirigée par un spécialiste des questions énergétiques ayant des connaissances dans le domaine des eaux usées.

l'ouvrage une base de décision fiable lui permettant d'établir un plan de rénovation et d'investissement.

Pour que les résultats de l'analyse détaillée puissent être intégrés rapidement dans le processus de planification, celle-ci doit être effectuée en même temps qu'est élaboré le projet de transformation. Les résultats des analyses purement énergétiques doivent être pris en compte au fur et à mesure dès le stade de l'avant-projet. Pendant la phase de projet proprement dite, les recommandations et objectifs d'ordre énergétique ne doivent jamais être perdus de vue et doivent être contrôlés régulièrement par le maître de l'ouvrage. A la moindre modification qui entraînerait une économie moins importante, des mesures doivent être prises immédiatement.

En cas de construction nouvelle, de transformation et d'agrandissement, la procédure est la même que pour une rénovation, si ce n'est qu'il faut définir très précisément la situation de départ avant de procéder à l'analyse détaillée. Si les constructions nouvelles se font rares dans notre pays, il n'en va en revanche pas de même des transformations et des agrandissements.

7.1.3 Le choix des spécialistes

L'analyse sommaire doit être exécutée par un ou plusieurs spécialistes qui puissent couvrir à la fois le domaine des eaux usées et celui de l'énergie. Il faut en outre qu'ils aient de l'expérience dans le domaine des économies d'énergie.

Le chef de projet devra, selon les conditions locales, mettre l'accent sur l'un ou l'autre domaine et coordonner les travaux des différents spécialistes.

Ces éléments clés doivent être déterminés avant de confier les mandats, afin de pouvoir constituer des équipes ad hoc.

Selon la capacité de la STEP, le nombre d'étapes d'épuration et les composantes qui la constituent, il faudra faire appel aux spécialistes des domaines suivants:

- technique des procédés (eaux usées, boues),
- électricité, mesurage, commande et régulation,
- construction,
- installations de couplage chaleur-force et installations classiques de production d'énergie.

7.1.4 Les étapes de l'optimisation énergétique

Selon qu'il est prévu ou non de procéder à une rénovation ou à un agrandissement, la procédure n'est pas la même. Les illustrations 7-2 (pas de rénovation prévue) et 7-3 (rénovation prévue) montrent dans quel ordre le maître de l'ouvrage doit prendre ses décisions.

Pas de rénovation/d'agrandissement prévue(e):

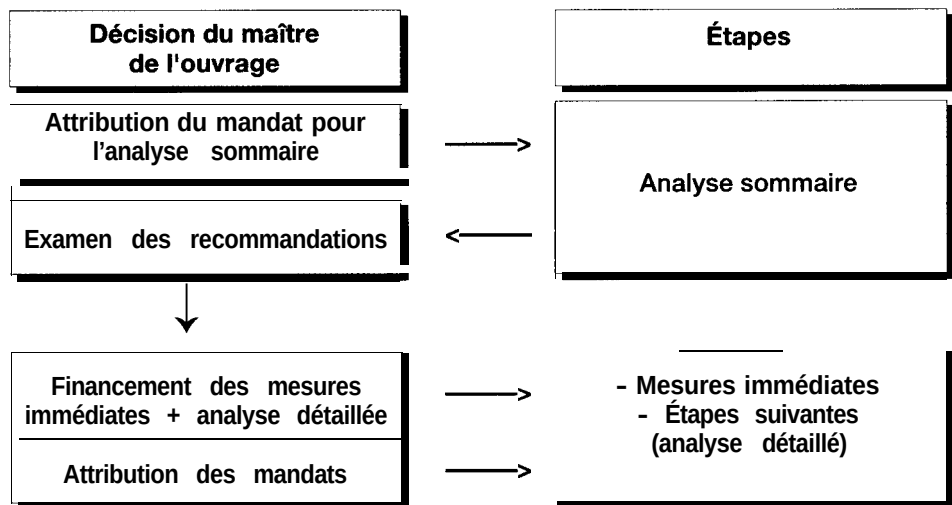


Illustration 7-2
Étapes successives d'une optimisation énergétique en l'absence de projet de rénovation/ d'agrandissement

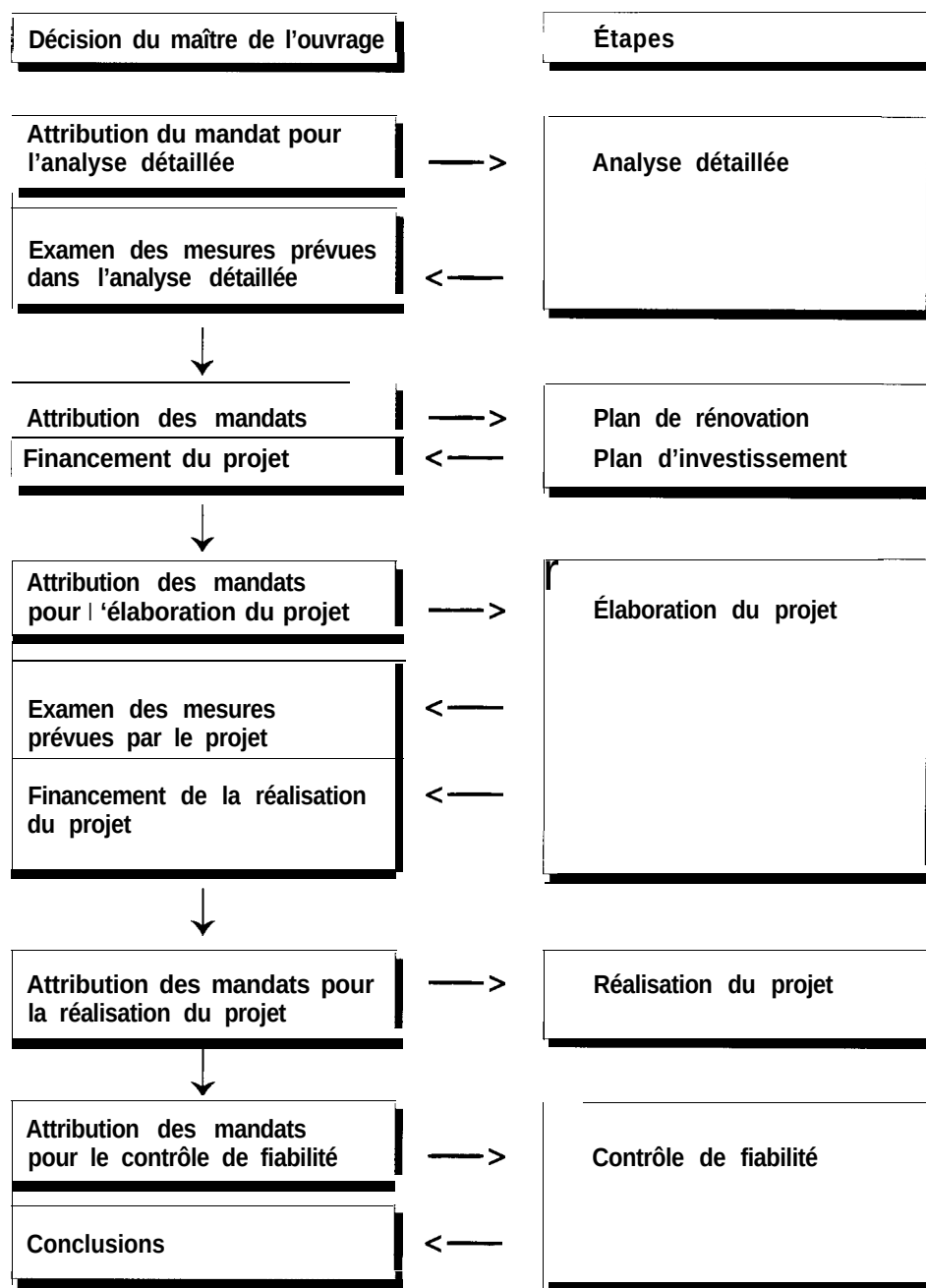


Illustration 7-3

Étapes successives d'une optimisation énergétique lorsqu'un(e) rénovation/agrandissement est prévu(e)

7.2 L'analyse sommaire

7.2.1

Objectif

L'analyse sommaire constitue la première étape préalable à l'optimisation énergétique. Elle consiste à évaluer grossièrement et à relativement peu de frais la qualité énergétique de la STEP, puis à faire les recommandations nécessaires en vue des étapes suivantes. Ces recommandations s'appuient sur une évaluation des carences, des autres besoins de rénovation, de transformation, d'agrandissement, etc. ou des modifications projetées/souhaitées dans le domaine de la technique des procédés, ainsi que sur une estimation sommaire de la qualité énergétique fondée sur les critères d'évaluation (cf. chap. 7.5). Ces recommandations contiennent également les mesures à prendre immédiatement, pour lesquelles le maître de l'ouvrage peut donner mandat tout de suite, les conditions de rentabilité étant favorables et le montant des investissements peu élevé.

7.2.2

Déroulement

Le maître de l'ouvrage étant au fait de l'urgence des mesures à prendre, il donne son feu vert pour la première étape et charge un spécialiste d'effectuer une analyse sommaire. L'urgence peut être dictée par des raisons énergétiques ou par les indications fournies par l'exploitant sur les carences et les améliorations possibles. L'analyse énergétique sommaire se déroule en deux phases (tableau 7-4).

P h a s e	Étapes
Situation actuelle	- Collecte des documents et données nécessaires (avec l'exploitant de la STEP) - Visite (avec l'exploitant de la STEP) - Analyse et description de la situation actuelle - Évaluation de la situation actuelle - Détermination des mesures immédiates
Rapport	- Établissement du rapport - recommandations - Présentation des résultats lors d'une séance

Tableau 7-4
Déroulement de l'analyse sommaire

Recommandations
fournies par l'analyse
sommaire:

- analyse détaillée
nécessaire ou
non,
 - date à laquelle
elle doit être ef-
fectuée,
 - estimation des
coûts,
 - mesures immé-
diates.
-

Pour procéder à l'analyse sommaire, utiliser le logiciel conçu à cet effet [66],

Analyse de l'état général de la STEP

Dans une première étape, le conseiller en énergie se procure les documents et données nécessaires auprès du mandant. L'exploitant de la STEP est bien évidemment la personne de référence à laquelle il s'adressera pour obtenir:

- les rapports d'exploitation
- les données relatives à la consommation d'énergie
- les éléments caractéristiques de la STEP
- un schéma des différents procédés.

Doivent figurer parmi ces différents éléments les indications nécessaires à l'évaluation sommaire de la consommation d'énergie (cf. chap. 75.2). En l'absence de ces données, l'exploitant fera poser sans tarder les installations de mesure et de relevé requises. Sur la base des documents et des indications de l'exploitant, le spécialiste détermine les éléments à analyser en priorité lors de sa visite sur place.

Objectif de cette visite: se faire une idée précise sur les appareils de mesure existants et leur fiabilité, ainsi que sur l'état des principaux consommateurs d'énergie et sur les possibilités de mise en œuvre des mesures immédiates. L'exploitant l'accompagne dans cette visite et le renseigne sur la situation globale, sur les carences énergétiques et générales, ainsi que sur ses projets et souhaits en matière de rénovation, de transformation ou d'agrandissement.

Expérience faite, cette visite devrait se dérouler en deux temps. Dans un premier temps, l'exploitant et le spécialiste

font le tour de la STEP. Afin de limiter le nombre d'heures au minimum, il convient de relever les données des gros consommateurs ou de ceux dont on sait que la consommation peut être réduite dans de grandes proportions, en ayant toujours en point de mire l'électricité et non l'énergie thermique. Une fois ces données établies, le spécialiste discute avec l'exploitant des principaux résultats obtenus.

Les documents et ces résultats permettent alors de faire une description de l'état général de la STEP ainsi qu'une évaluation sommaire de la consommation spécifique d'énergie et de la part à haute valeur énergétique du gaz de digestion valorisé (installations CCP).

Données générales (page de titre):

- Exploitant, maître de l'ouvrage, auteur du projet, délais
- Nombre d'habitants raccordés
- Volume d'eaux usées
- Âge de la STEP
- Consommation: électricité, énergie thermique, total (au moment de l'analyse sommaire)
- Coûts énergétiques: électricité, énergie thermique, total (au moment de l'analyse sommaire)

Carences et modifications:

- Liste des carences, propositions d'améliorations au niveau énergétique
- Rénovation, agrandissement, transformation, autres modifications

Estimation:

- Estimation de l'état général de la STEP sur la base de l'évaluation sommaire

Recommandation:

- Étapes suivantes: nécessité ou non de procéder à une analyse détaillée, motifs
- Coût de l'analyse détaillée et date à laquelle elle doit être effectuée
- Détermination des mesures immédiates avec estimation de leur coût et de leurs effets

Annexe:

- Documents (données de base et calculs)

Tableau 7-5
Structure et contenu d'un rapport d'analyse sommaire

7.2.3 Rapport

Les données relatives à l'état général de la STEP et les recommandations quant aux étapes énergétiques sont consignées dans un rapport. Les recommandations sont explicitées au maître de l'ouvrage au cours d'une séance. Celui-ci se prononce alors en faveur des mesures immédiates et confie les mandats nécessaires à la réalisation d'une analyse détaillée.

7.2.4 Coût et plan de travail

Le coût de l'analyse sommaire est fonction de la dimension et de la complexité de la STEP ainsi que de la qualité des documents existants. Pour une STEP de dimension moyenne, le spécialiste mettra entre trois et six jours pour accomplir son mandat (un jour de travail équivaut, selon les estimations SIA (1993) à environ 1000 francs). Pour des STEP de moins de 10 000 EH, ce coût sera donc moins élevé que pour des STEP de 50 à 100 000 EH, dans lesquelles la visite et l'évaluation des données recueillies prennent plus de temps.

- Collecte des données:	1 jour
- Visite:	1 jour
- Établissement du rapport:	1 jour
- Séance finale:	1 jour
Total:	4 jours de travail

Tableau 7-6
Temps nécessaire pour effectuer l'analyse sommaire d'une STEP de moyenne capacité

7.3 L'analyse détaillée

7.3.1

But et exigences

But

L'analyse détaillée a pour but de déterminer l'ensemble des mesures d'économie d'énergie qui peuvent être prises et de désigner au maître de l'ouvrage celles qui peuvent être mises en place dans le cadre d'une optimisation énergétique ou d'une rénovation générale. C'est sur cette base qu'il prendra sa décision et qu'il confiera les mandats nécessaires.

Caractéristiques de l'analyse détaillée

Pour que le maître de l'ouvrage puisse se prononcer en faveur d'une rénovation énergétique, le résultat global de l'analyse détaillée doit être présenté très clairement et donner une bonne vue d'ensemble:

- des économies d'énergie réalisables
- du montant des investissements
- de la rentabilité post-rénovation.

Les investissements doivent être indiqués avec une marge d'exactitude de $\pm 20\%$ pour l'ensemble des mesures et de $\pm 10\%$ pour la consommation d'énergie.

Il convient de distinguer (cf. annexe A5) entre les mesures à prendre

- immédiatement (Mi)
- à court terme (Mct)
- avec d'autres mesures (Ma).

Les différentes mesures doivent être décrites le plus brièvement possible, mais de façon suffisamment précise –

particulièrement les mesures énergétiques – pour que l'ingénieur n'ait pas de problème.

L'analyse détaillée doit répondre aux mêmes exigences qu'un avant-projet en matière d'exactitude et de précision de la description. Il n'est en revanche pas nécessaire de fournir des instructions d'exécution ou des propositions pour des produits ou des marques déterminés

Il est recommandé au maître de l'ouvrage de confier le mandat d'analyse détaillée en se fondant sur le cahier des charges (annexe A5). Pour ce qui est du rapport final, il devrait exiger qu'il soit rédigé conformément à l'exemple type [66]

Délai de mise en œuvre pour les mesures d'économie d'énergie énoncées dans l'analyse détaillée: un an pour les mesures immédiates, 2 à 3 ans pour les mesures à court terme, au plus tard dans le cadre d'une rénovation générale pour les mesures à prendre avec d'autres.



7.3.2 Déroulement

Limites du mandat

Le mandat doit être attribué en précisant bien l'état général de la STEP tel qu'il a été décrit dans l'analyse sommaire. N'entrent pas dans ce cadre les questions générales ou spécifiques relatives aux procédés de la STEP en son état actuel ou à des modifications futures (transformation ou agrandissement, accroissement du volume des eaux usées et changement de qualité de ces dernières).

Travaux préparatoires du chef de projet

Une fois le mandat attribué, le chef de projet doit en premier lieu se procurer auprès du mandant (le plus souvent l'exploitant de la STEP) les documents nécessaires (cf. annexe A.5). Sur la base

- des documents existants,
- des résultats de l'analyse sommaire ou d'une visite sur place
- de discussions avec l'exploitant de la STEP.

le chef de projet se fait une première idée de l'état général de la STEP et des améliorations qui peuvent y être apportées. Il peut alors établir un plan de travail détaillé.

Lors de la première visite sur place, il importe d'indiquer à l'exploitant les dispositifs de mesure et de relevé qui doivent être installés. Le financement des mesurages doit être convenu avant l'attribution du mandat à la personne qui les effectuera.

L'exploitant est d'une aide précieuse pour l'élaboration de l'analyse détaillée. Son expérience et ses connaissances de l'exploitation lui permettent de fournir des indications importantes qui ne peuvent qu'améliorer la qualité de l'analyse.

Procéder avec méthode afin de réduire au minimum les coûts liés à une analyse détaillée. Consentir une dépense plus importante uniquement si les économies réalisables y sont proportionnelles. Commencer par évaluer les principales économies d'énergie réalisables.

L'ingénieur mandaté pour effectuer l'analyse détaillée procède en quatre étapes, auxquelles s'ajoute encore le contrôle de fiabilité. A relever que les coûts de ce dernier doivent faire l'objet d'un poste séparé sur le contrat.

Étape	Travaux
État général	- collecte des documents et données existants (avec l'exploitant) - visite sur place (avec l'exploitant) - mesurages - description des principaux consommateurs d'énergie - détermination des mesures énergétiques pouvant être prises - établissement de deux bilans énergétiques (électricité + énergie thermique) - comparaison avec les critères d'évaluation - discussion sur la base des résultats intermédiaires (avec l'exploitant/le mandant)
Mesures isolées	- établissement de la liste des mesures isolées - brève description de chaque mesure - évaluation des économies réalisables pour l'électricité et pour l'énergie thermique - investissements (globaux et énergétiques uniquement) - rentabilité calculée sur la base du rapport coût-efficacité
Paquets de mesures	- désignation des différents types de mesures (Mi, Mct et Ma) - économies réalisables et rentabilité des mesures Mi, Mct et Ma - bilans énergétiques de l'état cible pour l'électricité et pour l'énergie thermique - estimation sur la base des critères d'évaluation
Rapport	- établissement d'un rapport avec recommandations - présentation des résultats au cours d'une séance avec le mandant
Contrôle de fiabilité	- au moment de l'élaboration du projet - après la mise en œuvre des mesures

Tableau 7-7
Les quatre étapes de l'analyse détaillée et le contrôle de fiabilité

Phase 1: état général de la STEP

Au cours de la première étape, l'ingénieur détermine la consommation énergétique de chacune des principales composantes de la STEP, ainsi que leur état énergétique et général, afin de pouvoir en déduire les possibilités d'économies réalisables. A ce stade déjà, le spécialiste doit se faire une idée de la pondération des mesures – étant entendu que la priorité doit être donnée à l'électricité –, afin de pouvoir ensuite se consacrer à la quantification des mesures isolées.

Pour des raisons d'efficacité, il importe de ne pas analyser en détail tous les consommateurs d'énergie, mais uniquement les plus gros d'entre eux (plus de 1 à 3 MWh/a) et, surtout, ceux dont on sait qu'ils offrent des possibilités d'économie importante. Il convient cependant quand même d'en relever un nombre équivalent à 95% de la consommation d'énergie électrique et thermique. Le temps nécessaire à cette opération n'est en réalité pas très long, puisqu'un quart des moteurs les plus puissants consomment 90% du total d'électricité. Pour ce qui est de la consommation d'énergie thermique, le seul gros consommateur est le traitement des boues.

Il s'agit ensuite de dresser la liste des consommateurs d'énergie en les regroupant par composantes d'installations (étapes des procédés selon chap. 2.2, dans l'ordre du passage des eaux). Dans les STEP de grande capacité, ces consommateurs doivent être subdivisés selon les recommandations SIA 380/4 et 380/1 (pour ces dernières, consacrées à

l'énergie dans le bâtiment, seulement lorsqu'une large part de l'énergie thermique doit être couverte par de l'énergie externe).

La description des différents consommateurs d'énergie doit être faite conformément à l'exemple type, à savoir:

- désignation du consommateur
- brève description et carences
- consommation d'électricité et d'énergie thermique
- mesures énergétiques possibles.

Il est recommandé de numéroté les différents consommateurs et de préciser le procédé d'épuration auquel ils correspondent. Chaque consommateur doit faire l'objet d'une brève description portant essentiellement sur les carences, à partir desquelles on peut déduire les mesures énergétiques à prendre. Il importe d'indiquer la consommation de chacun d'eux, calculée sur la base de la puissance effective en moyenne annuelle (énergie finale) et du nombre d'heures d'exploitation effectif par année. La puissance (énergie finale) s'obtient en divisant la puissance moyenne (énergie utile) par le rendement annuel moyen.

Pour les gros consommateurs ainsi que pour ceux qui permettent de réaliser des économies importantes, les données doivent être étayées par des mesurages. Deux méthodes pour ce faire: mesurer la consommation d'énergie ou, pour les appareils dont les entraînements ont une charge constante (puissance), se fonder sur les compteurs d'heures d'exploitation. Pour les nom-

Se référer aux exemples types et utiliser le logiciel [66] pour les analyses détaillées

Proposer des mesures isolées compatibles avec les exigences techniques, en indiquant les économies qu'elles entraînent, leurs coûts et leur rentabilité,

breux consommateurs plus petits, il suffit de procéder par extrapolation, en estimant d'une part la puissance annuelle effective moyenne (énergie finale) et, d'autre part, le nombre effectif d'heures d'exploitation annuelle.

Il convient en outre d'établir, pour l'ensemble de la STEP, deux bilans énergétiques de l'état général: un pour l'électricité et un pour l'énergie thermique. Ceux-ci doivent être subdivisés en fonction des principales composantes de la STEP. La consommation totale d'énergie est la somme de tous les consommateurs recensés, que l'on compare avec la valeur effective obtenue par mesurage pour la consommation d'énergie électrique et thermique. Les valeurs estimatives des différents consommateurs sont alors élevées jusqu'à ce que la somme corresponde à $\pm 5\%$ de la consommation totale mesurée.

Les différents paramètres relatifs à l'état général doivent être comparés avec les critères d'évaluation (cf. chap. 7.53). A chaque fois que ces derniers ne sont pas remplis, il convient de procéder à des analyses plus approfondies et de prendre des mesures. Si aucune mesure n'est prise, la décision en ce sens doit être dûment motivée. Parvenu à ce stade, le spécialiste doit une nouvelle fois évaluer l'état cible en fonction des critères d'évaluation (cf. phase 3).

Une fois l'état général de la STEP établi, il communique le résultat intermédiaire au mandant et à l'exploitant et leur soumet la liste des mesures d'économie d'énergie possibles, à l'exception de celles dont la mise en œuvre est impossible pour des raisons liées à l'exploita-

tion, aux techniques de procédé, aux dispositions légales ou à un quelconque autre motif.

Phase 2: les mesures isolées

Les mesures d'économie d'énergie déterminées sur la base de l'état général de la STEP doivent ensuite être formulées de façon concrète (qualité «avant-projet» au sens de la SIA).

Parallèlement, il convient de faire une première estimation des économies réalisables, de l'investissement requis et du rapport coût-efficacité, afin de fixer un ordre de priorité pour la mise en œuvre des mesures isolées.

Dans un premier temps, les mesures doivent être réparties entre les trois étapes de rénovation et classées dans chacune d'elles dans l'ordre des composantes des installations.

L'économie d'énergie réalisable grâce à chaque mesure doit faire l'objet d'un calcul séparé pour l'électricité et pour l'énergie thermique, fondé sur la réduction de la puissance moyenne effective annuelle d'une part, et sur la réduction du nombre d'heures d'exploitation annuelle d'autre part. En voici deux exemples (pour les détails d'ordre technique, cf. les chapitres 3 à 6).

Exemple 1: remplacement d'un moteur

Un moteur est remplacé par un modèle de puissance utile équivalente, mais de rendement moyen plus élevé. En moyenne annuelle, sa puissance effective (énergie finale) sera donc plus basse. Le nombre d'heures d'exploitation restant le même, la consommation d'énergie finale sera inférieure.

Exemple 2: installation d'un détecteur de mouvement pour l'éclairage

Le détecteur de mouvement déclenche automatiquement l'éclairage d'un grand atelier, par exemple, dès lors que plus personne n'y travaille. Il en résulte une réduction du nombre d'heures d'éclairage et, par conséquent, de la consommation d'électricité (pour une même puissance effective).

Le montant des investissements doit être précisé pour chaque mesure isolée. Lorsqu'il est important, il y a lieu de procéder à un appel d'offres, mais s'il est raisonnable et que les facteurs d'incertitude sont minimes, le spécialiste peut en faire lui-même l'estimation. Il importe de mettre en évidence d'une part les investissements globaux et, d'autre part, les investissements engendrés par la mise en œuvre des mesures d'économie d'énergie. N'entrent pas dans cette seconde catégorie les investissements liés à l'entretien, à la remise en état ou à l'amélioration d'une machine, ainsi qu'aux mesures requises pour satisfaire aux exigences légales.

Doivent en outre être spécifiés pour chaque mesure, dans l'optique de la rentabilité:

- la durée d'utilisation,
- les frais annuels,
- le rendement annuel,
- le rapport coût-efficacité.

En règle générale, la durée d'utilisation est déterminée par deux paramètres (construction et techniques) pour les

	Composantes spécifiques à la STEP			Composantes spécifiques aux bâtiments		
	Durée d'utilisation	Facteur de correction moyen	Annuité*	Durée d'utilisation	Facteur de correction moyen	Annuité*
Construction	2.5 années	1,8	0,078	30 années	2,0	0,073
Technique	12,5 années	1,4	0,116	15 années	1,5	0,103

* Intérêt: 6%

Tableau 7-8

Calcul de rentabilité en fonction de la durée d'utilisation supposée des composantes d'une STEP et de ses bâtiments

composantes spécifiques à la STEP et aux bâtiments. Dans certains cas toutefois, et pour des mesures d'économie d'énergie importantes, elle doit être plus différenciée (cf. recommandation SIA 380/1 et [17]).

Les frais annuels sont calculés selon la méthode de l'annuité sur la base des dépenses engendrées par les mesures d'économie d'énergie et par les éventuelles modifications qu'elles requièrent, ainsi que sur la base du taux d'intérêt consenti par les banques cantonales pour les investissements publics (cf. chapitre 7.4.2).

Investissements énergétiques = ensemble des coûts engendrés par la prise de mesures d'économie d'énergie, frais annexes et induits compris, + honoraires versés aux différents spécialistes.

Calculer la rentabilité des mesures sur la base du rapport coût-efficacité, compte tenu du renchérissement de l'énergie selon SIA 380/1 (cf. chap. 7.4.2).

Le rendement annuel est déterminé par la moyenne des économies d'énergie annuelles réalisées pour toute la durée d'utilisation, compte tenu du renchérissement de l'énergie, exprimé par le facteur de correction moyen (recommandation SIA 380/1).

Phase 3: les paquets de mesures

Les mesures isolées sont regroupées en trois paquets équivalant aux trois étapes de rénovation:

- mesures immédiates: à mettre en œuvre tout de suite
- mesures à court terme: à mettre en œuvre dans le cadre d'une rénovation énergétique
- mesures à prendre avec d'autres: à mettre en œuvre dans le cadre d'une rénovation générale

La répartition dans les différents paquets résulte des critères suivants:

- Mesures immédiates (Mi)
 - bon rapport coût-efficacité (inférieur à 0,3) ou adaptation urgente aux prescriptions légales (OPair, qualité de l'épuration) ou réparation (en cas de pertes, p. ex.);
 - pas d'incidence négative sur les mesures qui seront prises ultérieurement;
 - pas de problèmes pour l'exploitation, le traitement des eaux, la physique des constructions et les techniques.
- Mesures à court terme (Mct):
 - rapport coût-efficacité équilibré (environ 1,0, facteur de correction moyen pour le renchérissement de l'énergie selon SIA 380/1 inclus pour le paquet composé des mesures immédiates et des mesures à court terme);
 - pas de mesures immédiates ni de mesures à prendre avec d'autres.

- Mesures à prendre avec d'autres (Ma):
- mauvais rapport coût-efficacité ou autres facteurs impliquant leur mise en œuvre uniquement dans le cadre d'une rénovation générale.

Les résultats de l'analyse détaillée doivent être représentés sous forme de tableaux et de graphiques pour:

- l'état général de la STEP
- la situation après mise en œuvre des mesures Mi
- la situation après mise en œuvre des mesures Mi + Mct
- la situation après mise en œuvre des mesures Mi + Mct + Ma (= état cible),

et indiquer:

- la consommation d'énergie et les économies réalisables (électricité, énergie thermique, total),
- le montant des investissements (total et part énergétique)
- les frais annuels, le rendement annuel et le rapport coût-efficacité.

L'état cible tel qu'il a été déterminé par le spécialiste suppose la mise en œuvre des trois catégories de mesures. Si le rapport coût-efficacité est inférieur à 1,0 avec les mesures Mi + Mct, le responsable de l'analyse détaillée doit en proposer d'autres. Pour le paquet global, le rapport coût-efficacité doit se situer entre 1,5 et 2,0.

Phase 4: rapport

Les résultats de l'analyse détaillée doivent faire l'objet d'un rapport rédigé conformément à l'exemple type [66]. Il convient d'éviter les longues descriptions inutiles et de mettre en évidence l'essentiel, afin que les décisions puissent être prises sans hésitation.

Les résultats de ce rapport sont présentés et discutés au cours d'une séance.

Dernière étape: le contrôle de fiabilité

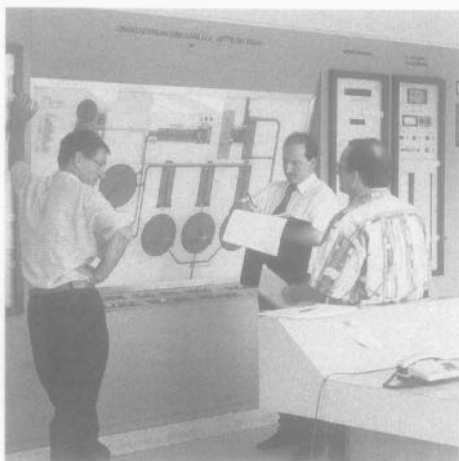
Le responsable de l'analyse détaillée doit être consulté après la mise en œuvre des mesures et au moment du contrôle de fiabilité. C'est en effet à lui qu'il incombe de vérifier si toutes les mesures d'économie d'énergie ont été prises. Toute modification doit être dûment motivée.

Les maîtres d'ouvrages sont par ailleurs invités à envoyer le rapport de l'analyse détaillée et les résultats du contrôle de fiabilité à l'OFEFP, afin que ce dernier puisse les communiquer aux maîtres d'ouvrages et spécialistes qui le souhaiteraient.

Principes à observer:

- la rentabilité des mesures Mi + Mct;
 - seuil du rapport coût-efficacité dépassé pour Mi + Mct + Ma (état cible),
-

7.3.3 Coût et plan de travail



Le chef de prolet doit impérativement veiller à ne pas consacrer trop de temps à l'analyse de l'état général de la STEP (un cinquième, voire un tiers du temps total au maximum). Il pourra toujours procéder à de nouvelles analyses s'il découvre des lacunes en cours de route.

nées de base requises, l'analyse détaillée prend entre 30 et 60 jours (1000 francs par jour), respectivement pour une STEP de 10 000 EH et 100 000 EH.

Le temps nécessaire à la réalisation d'une analyse détaillée dépend de plusieurs facteurs. Les Indications ci-dessous sont un ordre de grandeur pour une STEP normale, sans étape d'épuration complémentaire et sans Intervention spéciale. Effectuée par un spécialiste expérimenté disposant des programmes informatiques et des don-

État général	10 jours
Mesures isolées	25 jours
Paquets de mesures	5 jours
Rapport	10 jours
Total	50 Jours de travail

Tableau 7-9
Temps nécessaire pour effectuer l'analyse détaillée d'une STEP de moyenne capacité

7.3.4 Le financement

La mise en œuvre de mesures énergétiques dans une STEP de moyenne capacité coûte plusieurs millions de francs. Le moyen le plus approprié et le plus équitable de financer ces investissements est de recourir au principe pollueur-payeur par le biais des taxes d'épuration [18].

Il convient de rappeler ici que les mesures recommandées au maître de l'ouvrage - qu'il s'agisse des mesures immédiates ou des mesures à court terme - sont toutes rentables et que le fait de ne pas les mettre en œuvre pèse sur le montant des coûts d'exploitation.

Le principe pollueur-payeur

La consommation de chaque kWh d'électricité, m³ de gaz ou kg de mazout porte atteinte non seulement à l'environnement, mais aussi:

- aux bâtiments
- à la végétation et, par conséquent, aux revenus des agriculteurs,
- à notre santé.

Cela étant, les pouvoirs publics sont contraints de rénover les bâtiments et de verser des subventions aux paysans, et les primes d'assurance-maladie augmentent. A l'heure actuelle, ces coûts ne sont pas imputés aux responsables de ces atteintes - dans notre cas: les producteurs d'eaux usées -, mais supportés par l'ensemble des contribuables. dont certains sont «innocents»

Ces coûts externes, dont une partie seulement est à ce jour quantifiable, doivent être pris en compte par les communes, en se fondant sur les données RAVEL [15] établies pour chaque agent énergétique.

Respecter l'environnement en traitant correctement les eaux usées, mais également en procédant à une optimisation énergétique. Financer les investissements requis en appliquant le principe pollueur-payeur.

7.4 Le cahier des charges et le calcul de rentabilité

7.4.1

Le cahier des charges

Les analyses énergétiques doivent être effectuées sur la base d'un cahier des charges (cf. annexe A5) décrivant les tâches et prestations requises de la part du spécialiste mandaté par le maître de l'ouvrage. Ce document constitue en outre pour ce dernier un instrument de référence et de contrôle pour s'assurer que les objectifs sont atteints et les prestations fournies.

Une analyse énergétique ne saurait être élaborée sans la collaboration de l'exploitant. Celui-ci doit en effet accompagner le spécialiste lors de sa visite sur place, lui fournir toutes les données relatives à la STEP et effectuer les travaux nécessaires (mesurages, etc.).

Il est recommandé aux maîtres d'ouvrage de se fonder sur le cahier des charges tel qu'il est établi à l'annexe 5 pour attribuer les différents mandats. Seules les données de base précisant, par exemple, à qui incombe la responsabilité des mesures autres qu'énergétiques en cas de transformation ou d'agrandissement doivent être déterminées dans ce cas.

En recourant à ce document, ils sont assurés que le spécialiste se limite à l'essentiel et travaille de manière efficace, mais aussi qu'ils auront tous les éléments nécessaires pour prendre leur décision en vue des étapes suivantes et ce, à un prix raisonnable. Autre avantage de document type: la standardisation permettant d'enregistrer les résultats des différentes analyses à l'échelle nationale, les spécialistes peuvent s'y référer. La qualité du travail s'en trouve ainsi améliorée et les coûts réduits.

S'il va de soi que le montant absolu des économies d'énergie réalisables dans les STEP de petite capacité est moins important que dans les STEP plus grandes, le coût de l'analyse détaillée y est, par contre, proportionnellement plus élevé. Il convient donc, dans une STEP dont les coûts énergétiques sont inférieurs à 30 000 francs (moins de 10 000 EH raccordés) d'analyser uniquement les composantes et dispositifs les plus gourmands, ce qui n'exclut cependant pas de procéder avec soin, afin que les coûts des mesures puissent être donnés avec une précision de $\pm 20\%$. Le spécialiste appelé dans une STEP de ce type doit se limiter essentiellement à:

- établir des bilans énergétiques de l'état actuel et de l'état cible;
- décrire les mesures pouvant être prises pour les gros consommateurs d'énergie;
- proposer un paquet de mesure;
- faire des recommandations et rédiger un résumé.

Se référer au cahier des charges (cf. ann. 5) et à l'analyse modèle [66] pour l'analyse détaillée.

Mesurage de la consommation d'énergie

Les données d'exploitation et de consommation d'énergie recueillies tout au long du processus – de l'analyse sommaire au contrôle de fiabilité – jouent un rôle capital pour calculer le montant des économies et le rapport coût-efficacité.

Une attention toute particulière doit être portée aux statistiques et bases de données existantes, au relevé des données sur place et aux mesurages complémentaires.

La consommation d'énergie est donc un paramètre primordial de l'analyse détaillée. Elle doit être enregistrée avec de plus en plus de précision au fil de l'étude et faire l'objet de relevés différenciés pour l'électricité et l'énergie thermique et ce, pour chaque consommateur.

Structure et ampleur du rapport

Le rapport de l'analyse détaillée doit mettre en évidence l'état énergétique général de la STEP, ainsi que les mesures isolées et paquets de mesures à prendre au cours des trois étapes de la rénovation, conformément aux données répertoriées dans le cahier des charges (cf. annexe 5, partie II).

Doivent y figurer:

- a) les résultats nécessaires au maître de l'ouvrage pour prendre sa décision (le chef de projet conservant bien sûr tous les éléments (mesurages, données de base, documents) dont il aura besoin pour le contrôle de fiabilité);
- b) les calculs déterminants et les conclusions;
- c) les mesures proposées, détaillées comme le serait un avant-projet (selon SIA);
- d) les données chiffrées sur les économies d'énergie réalisables, les coûts, le rendement et le rapport coût-efficacité pour chaque mesure isolée et pour les trois paquets, de manière qu'elles puissent être reprises telles quelles au moment du contrôle de fiabilité;
- e) les paramètres relatifs à l'exploitation, les données de base, l'état des installations, les limites, etc.

Facteur déterminant pour le maître de l'ouvrage: la rentabilité, et non le montant des investissements.

7.4.2 Le calcul de rentabilité

Le maître de l'ouvrage décide de mettre ou non en œuvre les différentes mesures proposées en fonction de l'économie d'énergie qu'elles permettront de réaliser, bien sûr, mais également sur la base:

- de l'intégration dans l'exploitation (sécurité, coût),
- de leur influence sur la qualité de l'épuration,
- du montant des investissements et de la rentabilité (cf. chap. 1.3).

La rentabilité des mesures d'économie d'énergie dans les stations d'épuration peut être calculée en s'appuyant sur la recommandation SIA 380/1 ((L'énergie dans le bâtiment))).

Nombre de maîtres d'ouvrage axent encore leur décision sur le montant des investissements, alors que le critère déterminant doit être l'abaissement de la consommation d'énergie, compte tenu des aspects techniques et économiques de l'exploitation et de la qualité d'épuration requise. Ce faisant, ils oublient que la charge financière annuelle de la STEP sera certes alourdie d'un côté par le versement des annuités, mais allégée de l'autre par la réduction des frais d'exploitation sur toute la durée d'utilisation des composantes nouvelles ou modifiées.

La rentabilité d'un investissement peut être calculée de plusieurs manières. Pour ce qui est des mesures d'économie, la SIA recommande la méthode du rapport coût-efficacité et de l'annuité, qui consiste à mettre en balance la totalité des frais annuels moyens engendrés par une mesure pendant la durée d'utili-

sation prévue et le rendement annuel global. On obtient les frais annuels moyens en additionnant:

- les frais annuels liés aux investissements énergétiques,
- les frais de maintenance et d'entretien (personnel supplémentaire ou plus sollicité, frais annexes, etc.).

Quant au rendement annuel, il est la somme:

- des économies d'énergie réalisées,
- d'éventuelles autres économies induites au niveau de l'exploitation.

Les frais liés aux investissements énergétiques sont déterminés par l'annuité sur la base d'un taux d'intérêt donné (exemple: le taux hypothécaire fixé par les banques cantonales pour les travaux publics) et de la durée d'utilisation des composantes nouvelles ou modifiées (cf. chap. 7.3.2).

Le calcul de rentabilité ne portant que sur les mesures d'économie d'énergie, il convient de prendre en compte uniquement les investissements occasionnés par ces mesures et non les dépenses engendrées par la planification, la construction, l'acquisition d'installations, la mise en service, etc., pas plus que par l'entretien, la remise en état ou l'amélioration d'une machine, ni par les mesures requises pour satisfaire aux exigences légales. Ainsi, lorsqu'une pompe doit être remplacée pour raison d'usure, seule la part supplémentaire occasionnée par l'installation d'un moteur à faible consommation d'énergie sera prise en compte.

En règle générale, les composantes d'installations ne sont pas remplacées pour des raisons énergétiques, mais dans le cadre d'une rénovation générale. Les investissements requis doivent donc être financés par le budget d'entretien et seules les dépenses supplémentaires dues aux mesures énergétiques entreront dans le calcul de rentabilité. S'il devait toutefois arriver qu'une composante soit remplacée pour des raisons purement énergétiques avant le terme de sa durée d'utilisation, sa valeur résiduelle serait alors prise en compte dans le calcul des coûts énergétiques.

Les investissements énergétiques ayant une longue durée d'amortissement, le calcul de rentabilité doit être opéré en tenant compte de l'évolution des prix de l'énergie à long terme. Même s'il s'agit là d'une projection inévitablement entachée d'incertitude, le calcul ainsi obtenu sera plus réaliste qu'en partant des prix actuels. C'est la raison pour laquelle, dans l'analyse du rapport coût-efficacité, ces derniers sont multipliés par le facteur de correction moyen, exprimant le renchérissement de l'énergie. La recommandation SIA 380/1 table sur un renchérissement nominal annuel de 5% et sur un renchérissement réel de l'énergie de 1% (cf. chap. 7.3.2).

Le rapport coût-efficacité est calculé de la façon suivante:

$$\frac{F_a}{N} = \frac{F + (F_m \times m_m)}{(N_{en} \times m_{en}) + (N_{ex} \times m_{ex})}$$

F_a frais annuels (frs/a)

F , frais annuels liés aux investissements énergétiques (frs/a)

F_m frais annuels de maintenance et d'entretien

m_m facteur de correction moyen du renchérissement de la maintenance et de l'entretien

N rendement annuel (frs/a)

N_{en} économies d'énergie annuelles (frs/a)

N_{ex} économies annuelles au niveau de l'exploitation (frs/a)

m_{en} facteur de correction moyen du renchérissement de l'énergie

m_{ex} facteur de correction moyen du renchérissement des économies au niveau de l'exploitation



Toutes les mesures pour lesquelles $F_a/N \leq 1$ sont rentables et doivent être mises en œuvre.

Le responsable de l'analyse détaillée doit donc se fixer pour objectif des paquets de mesures dont le rapport coût-efficacité soit $\approx 1,0$. Autrement dit, si une mesure isolée n'est pas rentable, elle peut quand même être intégrée à l'un ou l'autre paquet.

Exemple de calcul pour une mesure isolée

Deux pompes de recirculation des boues (installées en 1975) doivent être remplacées pour des raisons d'exploitation. On saisit l'occasion pour redimensionner le système d'entraînement et la machine de manière à en optimiser la consommation d'énergie. Au terme de l'évaluation, le choix se porte sur des pompes et sur un système d'entraînement conformes aux exigences d'exploitation et offrant un rendement moyen plus élevé.

Frais

L'investissement occasionné par le remplacement des deux pompes s'élève à 85 000 francs, système de commande, adaptations et honoraires compris. Sans optimisation énergétique, il en aurait coûté 6.5 000 francs. Le montant à prendre en compte pour calculer la rentabilité des mesures d'économie d'énergie est donc de 20 000 francs

Frais annuels liés aux investissements (hypothèses: taux d'intérêt = 6%, durée d'amortissement = 12,5 ans -> annuité = 0,116):

$$F_i = \text{investissement} \times \text{annuité} \\ = 20000 \text{frs} \times 0,116 = 2320 \text{frs}$$

Frais de maintenance et d'entretien supplémentaire (nettoyage annuel des pompes, coût: env. 500 frs, facteur de correction moyen: 1.4):

$$F_m = F_m \times \text{mm} \\ = 500 \text{ frs} \times 1,4 = 700 \text{ frs}$$

Les frais annuels se montent donc à

$$F_a = F_i + F_m \\ = 2\,320 \text{ frs} + 700 \text{ frs} = 3\,020 \text{ frs}$$

Rendement

Les pompes consommant à elles deux 110 000 kWh/a et le rendement moyen passant de 0,45 à 0,585, l'économie d'énergie se monte à 25 385 kWh/a (prix de l'énergie: 0,14 fr./kWh, facteur de correction moyen: 1,4).

La suppression de la révision annuelle du moteur à courant continu (entretien du collecteur) permet de déduire env. 600 frs des frais de maintenance et d'entretien (facteur de correction moyen de: 1,4).

Le rendement annuel est donc de

$$N = (N_{én} \times m_{én}) + (N_{ex} \times m_{ex}) \\ = (3\,554 \text{ frs} \times 1,4) + (600 \text{ frs} \times 1,4) \\ = 5815 \text{frs}$$



Rapport coût-efficacité:

$$\frac{F_a}{N} = \frac{3\,020 \text{ frs}}{5\,815 \text{ frs}} = 0,52$$

La mesure est donc très rentable et justifie amplement un investissement de 20 000 francs.

Pour ce qui est du rendement, il n'a été tenu compte que des économies liées à l'exploitation au sens étroit du terme. Or, les pouvoirs publics profitant de la totalité du rendement économique, cet élément doit entrer dans le cadre d'une analyse de rentabilité. La brochure «RAVEL, une économie d'argent» [15] montre que la part quantifiable des coûts économiques peut être obtenue par simple majoration du prix de l'énergie.

Mettre en oeuvre
toutes les mesures
dont le rapport
coût-efficacité est
inférieur à 1,0.

7.5 Les critères d'évaluation énergétique

7.5.1

Objectif et méthode

Les critères d'évaluation ont pour but d'apprécier la qualité énergétique d'une STEP à partir de valeurs comparatives. On distingue:

- les critères d'évaluation sommaire
- les critères d'évaluation détaillée.

Évaluation sommaire

Elle permet au maître de l'ouvrage de se faire une idée de la nécessité ou non de procéder à une analyse détaillée.

Évaluation détaillée

Elle fournit au maître de l'ouvrage des indications sur la qualité énergétique de la STEP. Les critères d'évaluation servent également:

- d'instrument de contrôle pour les analyses détaillées et les projets;
- de base pour l'établissement de normes énergétiques par les associations spécialisées (SIA, VSA);
- de référence à la Confédération et aux cantons pour l'octroi de subventions et pour l'évaluation d'EIE, p. ex.

Les critères d'évaluation permettent d'examiner un projet sous l'angle énergétique. Ils peuvent également être utilisés pour évaluer la qualité énergétique d'une STEP existante (valeurs d'exploitation).

Ce sont des paramètres indispensables, car, de par la complexité et l'interaction des facteurs d'influence, les valeurs de consommation spécifique varient fortement, sans pour autant que des valeurs élevées soient obligatoirement synonymes de mauvaise qualité énergétique.

7.5.2

L'évaluation sommaire

Les critères d'évaluation sommaire permettant d'apprécier la qualité énergétique d'une STEP sont les suivants:

e_{BA} électricité spécifique consommée par une installation à boues activées (BA) pendant la phase de traitement biologique par EH_{DBO}

N_1 quantité de gaz de digestion récupéré à des fins énergétiques

N_2 quantité de gaz de digestion transformé en énergie mécanique ou électrique

P_{el} besoins électriques couverts par une installation de couplage chaleur-force (CCF)

P_{th} besoins thermiques couverts par une installation CCF et par la combustion directe du gaz de digestion

Cette évaluation sommaire permet de déterminer l'urgence d'analyses plus approfondies.

e : **électricité spécifique consommée par une installation à boues activées**

La consommation totale d'électricité d'une STEP est déterminée non seulement par sa qualité énergétique, mais également par des données spécifiques, telles que la qualité d'épuration requise. Dans le cadre de l'évaluation sommaire, seules les composantes les plus gourmandes, à savoir celles qui constituent l'installation à boues activées, font l'objet d'une analyse. La consommation

Objectif des critères d'évaluation: estimer la consommation d'énergie d'une STEP, de façon sommaire – peu coûteuse –, puis détaillée.

annuelle d'électricité de cette installation peut être calculée sur la base des rapports d'exploitation (nombre d'heures d'exploitation x puissance électrique absorbée).

E_{BA} électricité consommée par une

$$e_{BA} = \frac{E_{BA}}{EH_{DBO}}$$

Formule 7-10
Calcul de la quantité spécifique d'électricité consommée par les installations à boues activées

installation à boues
activées pendant le traitement biologique (kWh/a)

EH_{DBO} nombre (actuel) d'équivalents habitants biochimiques raccordés à une STEP, déterminé par la charge polluante
Valeur de base: 50 g DBO_5/EH_{DBO} · d échantillon décanté (EH)

Les valeurs de consommation spécifique pouvant varier fortement, il importe d'en confier l'interprétation à l'ingénieur de procédés, qui évaluera la qualité d'épuration atteinte durant la période d'analyse (dégradation des substances carbonées/nitrification totale/nitrification partielle/dénitrification éventuelle).

Évaluation de e_{BA}			
Dégradation de C uniquement	valeurs faibles	<10	kWh/EH.a
	valeurs moyennes	10- 15	kWh/EH.a
	valeurs élevées	>15	kWh/EH.a
Dégradation de C et de N uniquement	(nitrification totale jusqu'à + 10° C de température des eaux usées, sans dénitrification)		
	valeurs faibles	<16	kWh/EH.a
	valeurs moyennes	16 - 24	kWh/EH.a
	valeurs élevées	>24	kWh/EH.a

Tableau 7-I 1
Quantité spécifique d'électricité consommée par les installations à boues activées pendant le traitement biologique: valeurs comparatives

**Valeur cible N_1 ,
 $\geq 95\%$**

Formule 7-12

Quantité de gaz de digestion récupéré à des fins énergétiques

**Valeur cible N_2
 $\geq 27\%$**

Formule 7-13

Quantité de gaz de digestion transformé en énergie mécanique ou électrique

N_1 :

Degré de valorisation du gaz de digestion

Lorsque les STEP sont équipées d'installations de digestion des boues, il convient d'utiliser la plus grande quantité possible de gaz de digestion pour produire de l'énergie mécanique, électrique et thermique. Bien dimensionnées, les installations permettent d'atteindre un degré de valorisation (quantité valorisée / quantité produite) supérieur à 95%.

N_2 :

Proportion de gaz de digestion transformé en énergie mécanique ou électrique

$N_2 \geq C_1 C_2 \cdot N_1 = 0,95 \cdot 0,30 \cdot N_1$ ($N_1 = 0,95$)

C_1 quantité de gaz de digestion utilisé par une installation CCF

C_2 rendement (énergie mécanique/électrique) de l'installation CCF (énergie finale)

Le gaz de digestion hautement énergétique doit si possible être valorisé dans des systèmes produisant de l'énergie (mécanique, électrique) de haute valeur. Plus la part d'énergie finale mécanique et électrique est élevée, plus la qualité énergétique du gaz valorisé est bonne. Dans les installations bien dimensionnées, 27% de la quantité d'énergie contenue dans le gaz sont transformés en énergie mécanique et électrique (énergie finale).

Si cette quantité est inférieure à 27%, il est recommandé de procéder à une étude détaillée de la valorisation du gaz.

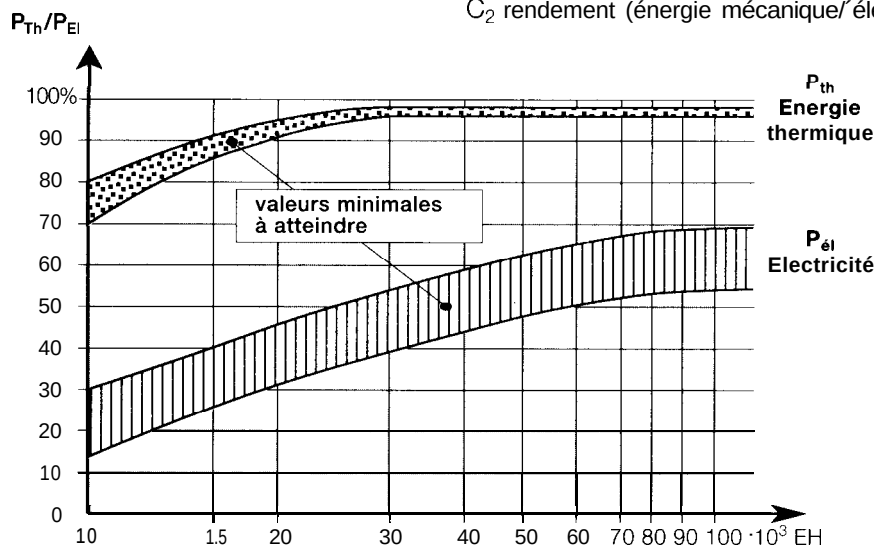


Illustration 7-14

Pourcentage d'énergie électrique et thermique fournie par une installation CCF en fonction de la dimension de la STEP (sans procédé d'épuration complémentaire, avec valorisation de la quasi-totalité du gaz de digestion)

P_{el} , P_{th} :

taux de couverture des besoins

Les taux de couverture résultant de la valorisation du gaz de digestion (énergie électrique et thermique) peuvent être déterminés sur la base des rapports d'exploitation. Il s'agit des quantités d'énergie utile (électrique, mécanique, thermique) provenant de l'alimentation des installations CCF par du gaz de digestion et de la chaleur utile résultant de sa combustion directe.

7.5.3 L'évaluation détaillée

Il y a lieu d'évaluer avec précision la qualité énergétique d'une STEP existante dans le cadre d'une analyse détaillée ou de l'étude approfondie d'un projet. Les critères d'évaluation doivent être établis pour les domaines suivants:

– ensemble de la STEP	e _{STD}
– domaine d'influence à l'extérieur de la STEP	tab. 7-19
– dimensionnement de la STEP	tab. 7-20
– composantes des installations de traitement des eaux usées	tab. 7-21
– composantes des installations de traitement des boues	tab. 7-23
– besoins énergétiques et isolation thermique	tab. 7-25

Il convient en outre d'apporter une attention particulière à trois consommateurs représentant 80 à 90% de la consommation total d'électricité:

- l'installation à boues activées	tab. 7-21
- le traitement des boues	tab. 7-23
- la station de relevage des eaux usées	tab. 7-21

Marche à suivre

La première étape consiste à recueillir les données de base relatives à la charge de la STEP existante (contenues dans les rapports d'exploitation) ou de procéder aux calculs y relatifs dans le cas d'une STEP en construction (tableau 7-I 5). Les autres données doivent être complétées au moyen des critères d'évaluation.

Dans une seconde étape, il s'agit de comparer les valeurs avec les critères d'évaluation. Si l'un ou l'autre n'est pas respecté, des mesures doivent être prises, sauf avis contraire dûment motivé.

Équivalents habitants par rapport:	
- à la charge hydraulique	EH
- aux substances polluantes (DBO ₅)	EH
- aux boues	EH
Débit d'eaux usées QTS	m ³ /d
Volume spécifique d'eaux usées	l/EH . d
Volume spécifique de polluants:	
- DBO ₅ échantillon déposé	g DBO ₅ /EH . d
- Ntk, recirculation incluse	g N-NH ₄ /EH . d
- MS _O /DBO ₅	g/g
Charge polluante:	
- DBO ₅ échantillon dépose	kg DBO ₅ /d
- N-NH ₄	kg N-NH ₄ /d

Tableau 7-i 5
Données de base pour l'évaluation détaillée

e_{STD}:
Consommation spécifique totale
d'électricité (STEP standard)

La méthode décrite ci-après – extraite d'une publication récente [27] – permet d'évaluer la consommation totale d'électricité d'une STEP équipée de bassins à boues activées.

Il s'agit de déterminer la consommation spécifique annuelle d'électricité par équivalent habitant raccordé (biochimique). La consommation (E_x) de composantes que l'on ne trouve pas dans une «STEP standard») – stations de relevage des eaux usées, installations de déshydratation des boues, installations d'épuration complémentaire (nitrification, filtration) – doit être retranchée de la consommation annuelle (E_a).

La consommation d'énergie ainsi réduite à deux étapes (déphosphatation chimique incluse) avec traitement des boues simple peut être évaluée par le biais de valeurs comparatives.

$$e_{STD} = \frac{E_a - E_x}{EH_{DBO}}$$

Formule 7-16
 Consommation spécifique d'électricité d'une STEP standard

e _{STD}	consommation spécifique d'électricité d'une STEP standard	(kWh/EH a)
E _a	consommation annuelle d'électricité	(kWh/a)
E _x	consommateurs non pris en compte	(kWh/a)
EH _{DBO}	cf. formule 7-10	

Les valeurs de consommation e_{STD} se situent, en moyenne, entre 15 et 25 kWh/EH a. Dans les STEP équipées d'installations de stabilisation aérobie, les valeurs spécifiques sont de 20 à 25% plus élevées (illustration 7-I 8).

La concentration de substances polluantes influe grandement sur e_{STD}. La charge volumique biochimique du bassin à boues activées (CV_{BA}) permet de la calculer:

$$CV_{BA} = \frac{C_{BA}}{V_{BA}}$$

Formule 7-17
 Charge volumique du bassin à boues activées

Objectif des valeurs comparatives e_{STD}, P_{él} et P_{th}: avoir une idée générale de la qualité énergétique de la STEP.

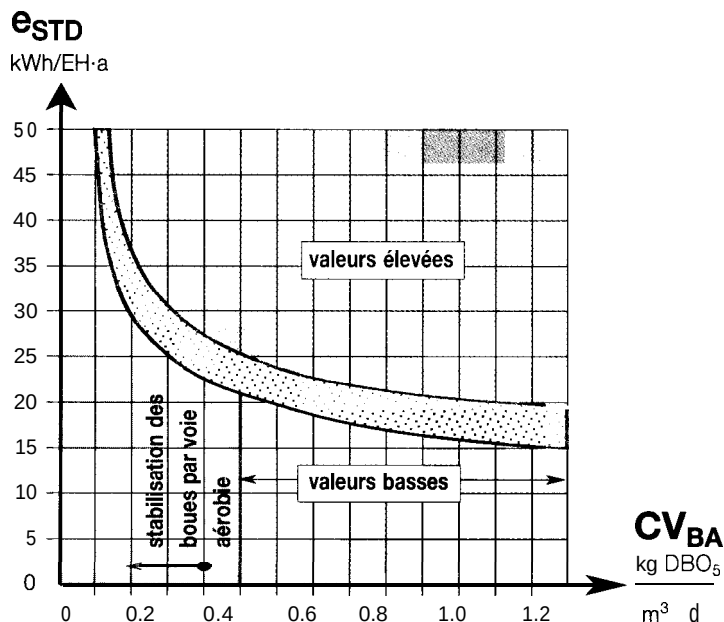


Illustration 7-I 8

Consommation spécifique totale d'électricité d'une STEP standard équipée de bassins à boues activées en fonction de la charge volumique DBO₅

CV_{BA} charge volumique des bassins à boues activées (kg DBO₅/m³ d)
 C_{BA} concentration de polluant (kg DBO₅/d)
 V_{BA} volume des bassins à boues activées (m³)

Dans l'illustration ci-dessus, les valeurs situées dans la bande et au-dessus sont qualifiées respectivement de valeurs moyennes et élevées.

Le tableau 7-I 9 recense les critères n'ayant pas une influence directe sur la STEP, mais entrant pour une large part dans sa consommation d'énergie. Le débit d'eaux usées est subdivisé en eaux polluées, eaux de pluie et eaux claires parasites. Lorsque le volume d'eaux claires parasites est élevé, il y a lieu de prendre des mesures, d'entente avec les services compétents, afin de le réduire.

Critère	Valeur cible	Remarques
Débit spécifique par temps sec (eaux polluées)	$q_{TS} \leq 250$ l/EH . d	à déterminer les jours sans pluie
Part d'eaux claires parasites	$q \leq 25\% q_{TS}$	à estimer, à partir des diagrammes quotidiens, p.ex.
Part d'eaux de pluie	Le débit à l'entrée de la STEP doit être faible: $Q_{max} = (1 + 1) Q_{TS}$	Se référer au plan général d'évacuation des eaux et au dimensionnement hydraulique de la STEP

Tableau 7-I 9
Critères d'influence extérieurs à la STEP (à l'entrée)

Critère	Valeur cible	Remarques
Traitement des eaux de pluie	cf. tableau 7-9 pas de déversements intermédiaires	Se référer au plan général d'évacuation des eaux
Dimensionnement hydraulique	Pas de réserves inutiles: il n'est pas nécessaire d'avoir un écoulement normal partout pour Q_{max}	Examiner le profil hydraulique longitudinal
Composantes mécaniques	Dimensionner les machines en fonction de la charge prévue jusqu'au terme de leur durée d'utilisation	A déterminer à partir des données inscrites dans le projet et des valeurs d'exploitation

Tableau 7-20
Dimensionnement des STEP: critères déterminants

Critère	Valeur cible	Remarques
Station de relevage Rendement	Pompes à vis ≥ 65% Pompes fermées ≥ 70%	Pompe et moteur
Dessableur (aéré) Consom. d'électricité spécifique	≤ 8 - 20Wh/m ³ ·h	Valeurs selon chap. 2.3.4
INSTALLATION À BOUES ACTIVÉES	Valeurs d'O ₂ minimales du système d'apport d'air.	illustration 7-22

Tableau 7 21
Traitement des eaux usées: critères de quelques composantes (dans l'ordre de passage des

INSTALLATION À BOUES ACTIVÉES

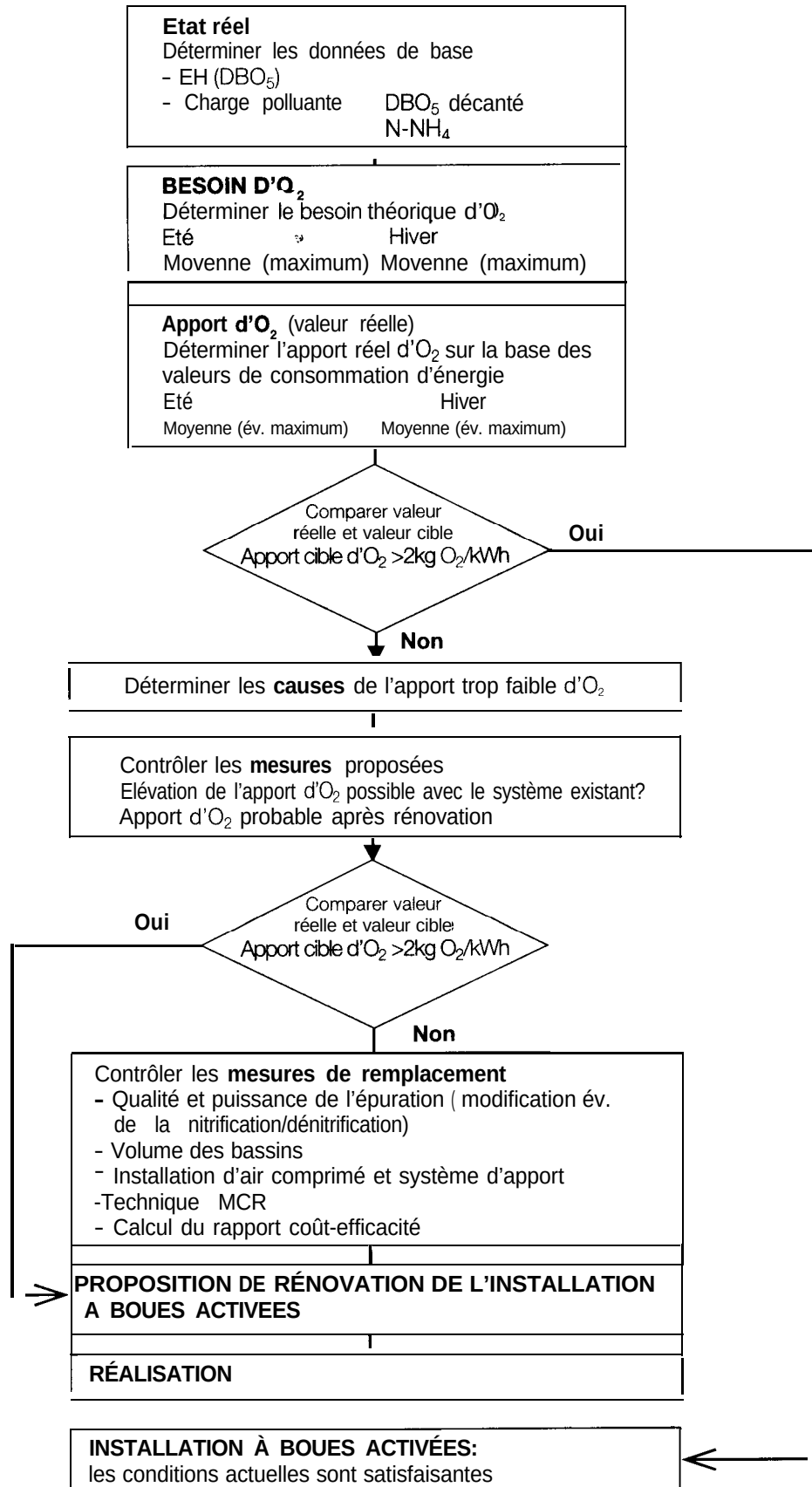


Tableau 7-22

Évaluation du système d'apport d'air dans les bassins à boues activées

Critères	Valeurs cibles	Remarques
TRAITEMENT DES BOUES Teneur en MS - Boues fraîches dans le b. de décantation prim. après épaississement statique après déshydratation mécanique - Boues en excès Dans le b. de décantation sec. après épaississement mécanique - Boues digérées sans déshydratation mécanique avec déshydratation mécanique - Déshydratation des boues	Teneur minimale en MS 4-5%MS 5-6%MS 6-7%MS 0,5 - 0,8% MS 5-7%MS 6% MS 6-7%MS dépend du système de déshydratation (cf. tab. 3-26) min. 25% MS	Si une ou plusieurs valeurs ne remplissent pas les conditions minimales, contrôler ces valeurs, prendre des mesures ou justifier d'éventuelles valeurs plus basses.
Consommation d'énergie thermique requis par le traitement des boues	Valeurs pour les STEP de 50 000 EH et plus Stabilisation anaérobie mésophile; temps de digestion: 20 jours $\text{Valeur cible } \frac{E_e}{E_t} \leq 1.30$ Influence du volume du digesteur sur la valeur cible: cf. ill. 7-24 Installations avec hygiénisation: avec pasteurisation $\leq 1,34$ avec fermentation aérobie thermophile $\leq 1,42$	E_e consommation effective d'énergie thermique requise par le chauffage des boues et due aux pertes de transmission du digesteur + aux pertes des conduites de l'hygiénisation E_t besoin théorique d'énergie thermique requis pour amener les boues à la température du digesteur
Fonction de l'installation de digestion	Taux de décomposition minimal Décomposition de MSO $\geq 45\%$	Détermination du degré de décomposition de la matière sèche organique (MSO)
Production de gaz de digestion	Production spécifique ≥ 750 l/kg MSO déc. ≥ 340 l/kg MSO	rapportée à la MSO décomposée rapportée à la MSO introduite dans le digesteur
Rendement moyen des stations de pompage	Rendement moyen minimal des pompes fermées 170%	Pompe et moteur

Tableau 7-23
Traitement des boues: critères de quelques composantes

Le tableau 7-25 présente les critères en relation avec la valorisation du gaz de digestion et l'isolation thermique, pour laquelle les STEP sont soumises à des exigences légales minimales. Ces dernières devraient être plus élevées pour les installations de traitement des boues, qui fonctionnent toute l'année. Pour ce qui est du chauffage des bâtiments, il convient de se référer à la recommandation SIA 380/1, en veillant toutefois à ne pas produire plus d'énergie thermique (rejets thermiques des installations CCF) que la STEP ne peut en consommer.

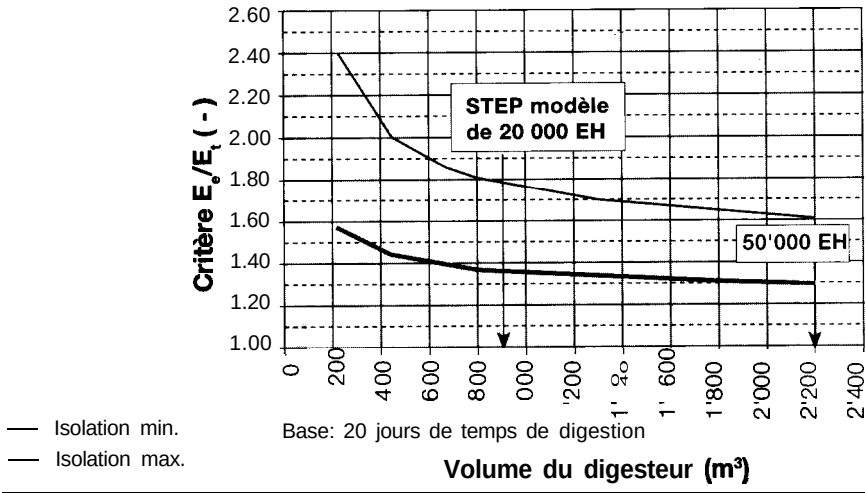


Illustration 7-24
Déperditions thermiques au cours du traitement des boues en fonction du volume du digesteur (cf. tableau 7-23)

Critères	Valeurs cibles	Remarques
STEP avec installation de digestion Part de gaz de digestion valorisé Part utile pour l'énergie mécanique et électrique Part de la consommation d'électricité fournie par autoproduction Part de la consommation d'énergie thermique fournie par autoproduction	Tous les critères d'évaluation relatifs à la valorisation du gaz de digestion se trouvent dans l'évaluation sommaire.	cf. chapitre 7.5.2
Isolation thermique minimale Isolation thermique plus élevée	Les exigences légales et techniques récentes sont-elles remplies? La rentabilité est-elle optimale pour: le digesteur - les conduites de boues chauffées - l'hygiénisation - l'isolation et le chauffage des bâtiments?	Législation sur l'énergie Lois cantonales SIA 180, 180/1, 380/1 cf. chapitre 5.2.1

Tableau 7-25
Valorisation du gaz de digestion et isolation thermique

Annexes

	pages
A1 Définitions et abréviations	206
A2 Unités d'énergie et conversion	214
A3 La technique des procédés	217
A4 Dispositions légales	226
A5 Cahier des charges	226

A1 Définitions et abréviations

A1.1

Traitement des eaux usées et des boues

Aérobie	Se dit d'une réaction biochimique qui se produit en présence d'oxygène
Âge des boues	Temps de séjour d'un flocon de boue dans le bassin à boues activées; facteur utilisé pour déterminer le volume du bassin en fonction de la qualité d'épuration requise
Anaérobie	Se dit d'une réaction biochimique qui se produit en l'absence d'oxygène
Anoxique	Se dit d'une réaction biochimique qui se produit avec de l'oxygène lié
BA	Bassin à boues activées, boues activées
Boues activées	Mélange de micro-organismes vivants et morts (biomasse) se trouvant dans le bassin à boues activées
Boues digérées	Etat des boues à l'issue du processus de digestion
Boues en excès	Boues activées retirées du traitement biologique
Boues en retour	Boues issues du bassin de décantation secondaire et réintroduites dans le bassin à boues activées
Boues fraîches	Boues non encore traitées retirées du bassin de décantation primaire
Boues mixtes	Mélange de plusieurs types de boues: de boues fraîches et de boues en excès, par exemple
DBO ₅	Demande biologique d'oxygène par litre d'eaux usées (mg O ₂ /l) calculée sur 5 jours
DCO	Demande chimique d'oxygène par litre d'eaux usées (mg O ₂ /l)
Déshydratation	Élimination de l'eau par voie mécanique

Eaux troubles	Eaux résiduelles issues de l'épaississement ou de la déshydratation des boues
EH	Équivalent habitant
	Somme des habitants raccordés à une STEP et de la charge imputable à l'industrie et à l'artisanat convertie en équivalents habitants. On distingue:
EH_{Boues}	charge de l'installation de traitement des boues (particules solides)
EH_{DBO}	charge biochimique de la STEP (substances polluantes)
EH_h	charge hydraulique de la STEP (débit)
Épaississement	Décantation des particules solides par gravité
Kjeldahl	voir Ntk
Mésophile	Se dit des micro-organismes qui vivent dans des conditions optimales à des températures situées entre 25 et 40°C et qui se reproduisent idéalement entre 10 et 55°C
Mode d'élimination	Élimination de la totalité des boues indépendamment de l'agriculture (incinération, etc.)
Mode de valorisation	Valorisation des boues d'épuration dans l'agriculture sous quelque forme que ce soit (boues digérées hygiénisées, boues déshydratées, boues épaissies, boues chaulées, boues sèches, etc.)
MS	Matière sèche (%)
MSO	Matière sèche organique (%)
MSo	Part organique de la matière sèche
M_t	Matières totales insolubles

N-NH ₃ , (azote total)	Somme de l'azote exprimé sous forme d'azote N-NH ₄ ⁺ et d'azote ammoniacal N-NH ₃ (mg N/l)
N _{org}	Kjeldahl: méthode d'analyse permettant de déterminer l'azote organique
PF	Pertes au feu, pertes par calcination
Psychrophile	Se dit des micro-organismes qui vivent dans des conditions optimales à des températures inférieures à 20°C
Q	Débit d'eaux usées (m ³ /s)
Q _{Tp}	Débit maximal d'eaux usées absorbable par une STEP par temps de pluie, composées d'eaux polluées (d'origine domestique, artisanale et industrielle), d'eaux claires parasites et d'eaux de pluie
Q _{Ts}	Débit maximal d'eaux usées absorbable par une STEP par temps sec, composées d'eaux polluées (d'origine domestique, artisanale et industrielle), d'eaux claires parasites et d'eaux de pluie
R _c	Résidus de calcination
STEP	Station d'épuration des eaux usées (STEP) Ensemble des installations permettant d'épurer les eaux usées et d'en traiter les produits résiduels (boues). Abréviation: STEP
Taux de recirculation	Rapport entre le débit d'eaux usées/de boues remises en circulation et le débit d'eaux usées/de boues à l'entrée; exemple: boues en retour dans les bassins à boues activées ou recirculation des eaux usées dans les lits bactériens
Thermophile	Se dit des micro-organismes qui vivent dans des conditions optimales à des températures situées entre 40 et 60° C
TSS	Total Suspended Solids: TSS = M _t (g MS/l)

A1.2 Energie

Bilan énergétique	Somme de toutes les énergies recensées à l'entrée et à la sortie d'une STEP
Coefficient de performance	Rapport entre la chaleur utile fournie par une pompe à chaleur et l'énergie requise pour le compresseur
Consommation d'énergie finale	Energie consommée par une STEP sous forme d'énergie finale
Couplage chaleur-force	Moteur à combustion interne, généralement couple à une génératrice électrique, pour la production d'énergie thermique et d'énergie mécanique
Couplage chaleur-force compact	Installation de couplage chaleur-force standard
Degré Celsius	Unité de température du système technique d'unités ("C)
Durée d'utilisation	Durée moyenne pendant laquelle une installation ou une composante d'installation est utilisée, exprimée en années (a)
Énergie	Somme de la quantité de travail et des rejets thermiques, exprimée en joules (J)
Énergie finale	Energie fournie à une STEP sous forme d'huile de chauffage, de gaz, de chauffage à distance et d'électricité (pour les combustibles, le pouvoir calorifique inférieur sert de référence)
Énergie primaire	Energie d'origine naturelle: force hydraulique, pétrole brut, gaz naturel, houille, etc.
Energie thermique	Energie de chauffage + énergie d'eau chaude
Énergie thermique totale	Energie de chauffage + énergie d'eau chaude + chaleur de procédé
Énergie thermique utile	Energie utilisée pour le chauffage et l'eau chaude

Énergie utile	Energie utilisée sous forme d'éclairage, d'énergie mécanique et thermique et de chaleur de procédé
indice énergétique	Quantité annuelle d'énergie finale consommée pour l'éclairage ainsi que pour la production de l'énergie thermique totale (énergie thermique, eau chaude, chaleur de procédé) et de l'énergie mécanique; rapportée à la surface de référence énergétique (à l'exception de la chaleur de procédé) et exprimée en MJ/m ² a
Installation de production de chaleur	Installation libérant de l'énergie pour la production thermique en transformant l'énergie finale en énergie utile
Kelvin	Unité de température fondée sur le zéro absolu (0 K = - 273°C) et unité des intervalles de température (K)
MCR	Mesure, contrôle et régulation (technique)
Puissance	Quantité d'énergie fournie par unité de temps, exprimée en watts (W)
Puissance thermique à installer	Puissance maximale requise pour couvrir le besoin thermique (facteur utilisé pour dimensionner les installations de production de chaleur)
Rendement	Rapport momentané entre la puissance fournie par et à une installation; la moyenne annuelle de ce rapport ajoutée aux pertes dues à la production, au stockage et à la distribution donne le rendement moyen η
Rendement moyen η /Électricité	Rapport annuel moyen entre l'énergie électrique utile fournie et la consommation d'énergie électrique finale, énergies auxiliaires comprises

Rendement moyen η /Énergie thermique Rapport annuel moyen entre l'énergie thermique utile fournie et la consommation d'énergie thermique finale, pertes dues à la production, au stockage et à la distribution comprises

SI Système international d'unités; bases: le mètre (m) pour la longueur, le kilogramme (kg) pour la masse et la seconde (s) pour le temps

A2 Unités d'énergie (selon SI) et conversion

a	an	
d	jour	
GJ	gigajoule	(1 0 ⁹ joules)
h	heure	
J	joule	
K	degré kelvin (température absolue)	
kg	kilogramme	
kJ	kilojoule	(10 ³ joules)
kW	kilowatt	(10 ³ watts)
l	litre	
m	mètre	
MJ	mégajoule	(1 0 ⁶ joules)
Pa	pascal	(N/m ²)
s	seconde	
W	watt	
°C	degré Celsius (température)	

Facteurs de conversion

Puissance:					
1 kcal/h	=	1,163 W	1 W	=	0,8598 kcal/h
1 Mcal/h	=	1,163 kW	1 kW	=	0,8598 Mcal/h
1 Gcal/h	=	1,163 MW	1 MW	=	0,8598 Gcal/h
1 Tcal/h	=	1,163 GW	1 GW	=	0,8598 Tcal/h

Consommation d'énergie (travail)

1 kcal	=	10 ³	cal	=	4,187	kJ	=	1,163	Wh
1 Mcal	=	10 ³	kcal	=	4,187	MJ	=	1,163	kWh
1 Gcal	=	10 ⁶	kcal	=	4,187	GJ	=	1,163	MWh
1 Tcal	=	10 ⁹	kcal	=	4,187	TJ	=	1,163	GWh
1 kWh	=	10 ³	Wh	=	3,600	MJ	=	859,8	kcal
1 MWh	=	10 ³	kWh	=	3,600	GJ	=	859,8	Mcal
1 GWh	=	10 ⁶	kWh	=	3,600	TJ	=	859,8	Gcal
1 TWh	=	10 ⁹	kWh	=	3,600	PJ	=	859,8	Tcal
1 kJ	=	10 ³	J	=	0,2388	kcal	=	0,2778	Wh
1 MJ	=	10 ³	kJ	=	0,2388	Mcal	=	0,2778	kWh
1 GJ	=	10 ⁶	kJ	=	0,2388	Gcal	=	0,2778	MWh
1 TJ	=	10 ⁹	kJ	=	0,2388	Tcal	=	0,2778	GWh

Conversion en d'autres agents énergétiques

	MJ	kg de houille	kg d'huile EL	m ³ n de gaz naturel (pci)	kWh d'électri- cité	kg de bois
1 kg de houille	29,3	1,00	0,69	0,87	8,14	1,89
1 kg d'huile de chauffage EL *	42,7	1,46	1,00	1,26	11,86	2,75
1 m ³ de gaz naturel pci**	33,8	1,15	0,79	1,00	9,39	2,18
1 kWh d'électricité	3,6	0,12	0,08	0,11	1,00	0,23
1 kg de bois *** (séché à l'air)	15,5	0,53	0,36	0,46	4,31	1,00

- * 1 l d'huile de chauffage = 0,84 kg d'huile de chauffage
- * pci = 0,90x pcs
- ** 1 kg de copeaux = 0,78 kg de bois (séché à l'air)

A3 La technique des procédés

A3.1 STEP modèle

(selon ATV A1 31)

DONNÉES DE BASE

Équivalents habitants hydrauliques/biologiques/boues 20 000 EH

Production spécifique d'eaux usées et de polluants

Production d'eaux usées		300 l/EH d
Débit d'eaux usées	QTS	6 000 m ³ /d
Substances polluantes	DBO ₅ décantée	50 g DBO ₅ /EH d
(Kjeldahl)	Ntk avec recirculation	8 g N-NH ₄ /EH d
	MSo/DBO ₅ décantée	0,90

Charge polluante	DBO ₅ décantée	1 000 kg DBO ₅ /d
	N-NH ₄	160 kg N-NH ₄ /d

ÉPURATION DES EAUX

STEP avec nitrification totale à 10°C

En été, il est possible d'exploiter une partie du bassin à boues activées en anoxie et de dénitrifier.

Installation à boues activées

Âge des boues	10d	
MS dans le bassin	3,0 kg MS/m ³	active, sans P
Taux de recirculation	1,0	

Volume du bassin (VBA) 3 000 m³

Besoins en oxygène

Les valeurs, calculées avec des marges de sécurité, permettent de dimensionner le système d'apport d'air.

Exploitation hivernale Nitrification jusqu'à 10°C

avec charge maximale de C	2,5 kg O ₂ /kg DBO ₅
avec charge maximale de N	3,5 kg O ₂ /kg DBO ₅

—> Charge d'O₂ maximale 148 kg O₂/h

—> Charge d'O₂ moyenne 94 kg O₂/h

Exploitation estivale Nitrification, dénitrification (30%)
 env. 70 kg NO₃/d sont dénitrifiés pour un taux de
 recirculation de 1,0

avec charge maximale de C 2,2 kg O₂/kg DBO₅
 avec charge maximale de N 2,9 kg O₂/kg DBO₅

—> Charge d'O₂ maximale 122 kg O₂/h
 —> Charge d'O₂ moyenne 82 kg O₂/h

Besoin d'O₂
 (en kg O₂/h)

	Été		Hiver	
	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
Dégradation de C	56.3	64.7	58.6	87.8
Nitrification	36.4	91.1	35.6	89.1
Réduction par dénitrification	-10.9	-25.9	0.0	0.0
Besoin total d'O ₂	81.8	121.5	94.2	147.7

Apport d'O₂ déterminant pour le dimensionnement:

Cas 1:

Charge maximale de C et charge moyenne de N

Cas 2:

Charge maximale de N et charge moyenne de C

—> cas déterminant pour le système d'apport d'O₂

**Consommation d'électricité requise
 pour l'apport d'oxygène**

Hypothèses:

Insufflation de fines bulles en profondeur

Profondeur d'insufflation 4,0 m

Apport d'O₂ 8 g O₂/Nm³ m

Apport spécifique d'oxygène 2,0 kg O₂/kWh (valeur élevée)

Les valeurs moyennes quotidiennes correspondent à la consommation <<effective>>, sans marge de sécurité.

Consommation d'électricité par jour (en kWh/d)	Été		Hiver	
	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
Dégradation de C	590	(776)	614	(1054)
Nitrification	381	1093	373	1069
Réduction par dénitrification	-114	-311	0	0
Consommation totale d'énergie	857	(1372)*1	987	(1683)*2
Puissances (en kW)	36	57	52	70
Cons. spécifique (en kWh/m ³)	0.143	Base: 300 l/EH d	0.164	
Moyenne annuelle (en kWh/m³)	0.154			

*1 1458=676+1093-311

*2 1772=703+1069

Influence de l'apport spécifique d'oxygène

Apport spécifique d'oxygène	(en kg O ₂ / kWh)	2.00	1.50
Consommation spécifique d'électricité	en kWh/m ³	0.154	0.205

Valeurs de rejet (Pollution résiduelle à la sortie de la STEP)

	Hiver	Eté	Unité
DBO ₅	< 10	< 10	mg/l
N-NH ₄	2	-0	mg/l
N-NO ₃	< 25	< 15	mg/l

TRAITEMENT DES BOUES

Substances polluantes	Boues fraîches		54 g MS/EH d	
	Boues en excès		45 g MS/EH d	
	issues de la déphosphatation		11 g MS/EH d	
	Total		110 g MS/EH d	2 200 kg/d
	part de MSO		60 g MS/EH d	
Boues fraîches	bassin de décantation primaire	4% MS	55 m ³ /d	2 200 kg/d
	épaississeur	5% MS	44 m ³ /d	2 200 kg/d
Stabilisation	décomposition de MSO		50%	600 kg/d
Boues digérées		6% MS	27 m ³ /d	1 600 kg/d
	déshydratées	25% MS	6,40 m ³ /d	1 600 kg/d

A 3.2 Combinaison des procédés de nitrification et de dénitrification

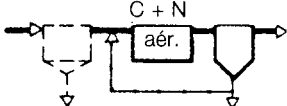
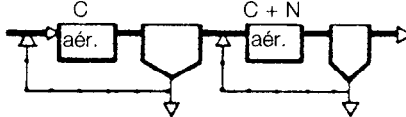
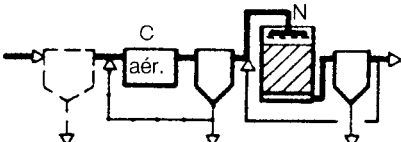
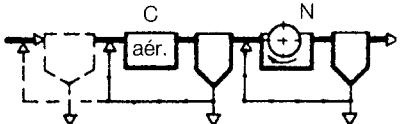
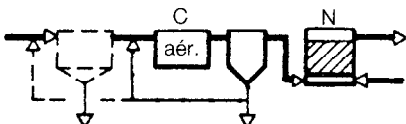
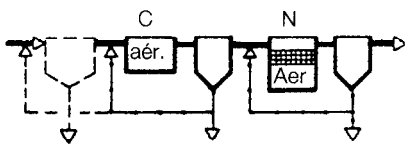
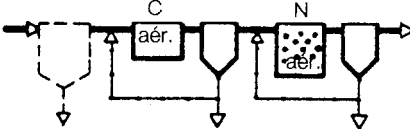
Nitrification		Rendement d'élimination moyen de N-NH ₄
C = Dégradation des substances carbonées D = Dénitrification N = Nitrification		
Biologie à 1 étage		92 %
Biologie à 2 étages		92 %
Film biologique: lit bactérien		92 %
Film biologique: disques biologiques immergés rotatifs		92 %
Film biologique: réacteur noyé à cultures fixées (construit selon le principe du filtre)		92 %
Film biologique: réacteur installé dans le bassin d'activation		92 %
Film biologique: lit fluidisé installé dans le bassin d'activation		92 %

Schéma de combinaison des procédés et rendement, en relation avec l'oxydation de N [45]

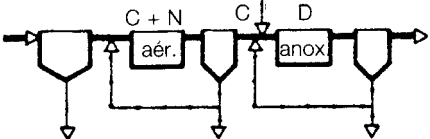
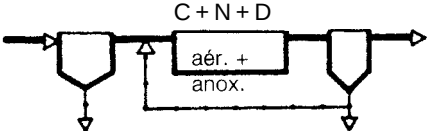
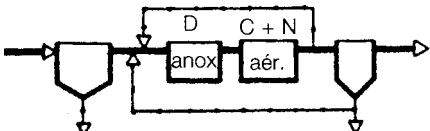
Nitrification/Dénitrification		Élimination de N moyenne
Combinaisons des procédés		
Dénitrification postérieure avec apport externe de substances carbonées (variante: dérivation de l'eau usée après la décantation primaire)		80-100%
Dénitrification simultanée		60 - 80 %
Dénitrification en tête		R = 200 % 55-75 % R = 400 % 70-80 %

Schéma de combinaison des procédés, en relation avec l'élimination de N [45]

C = Dégradation des substances carbonées

D = Dénitrification

N = Nitrification

A 3.3
Besoin d'oxygène (selon ATV
A131 [25])

Le besoin en oxygène d'une installation à boues activées est déterminé sur la base de la consommation d'oxygène requise pour dégrader les composés du carbone (O_{DBO}) et pour oxyder les composés de l'azote (O_N).

On obtient l'apport d'oxygène requis (O_e) en appliquant la formule suivante:

$$O_e = \frac{C_s}{C_s - C_x} (O_{DBO} \cdot f_C + O_N \cdot f_N)$$

O_e	apport d'oxygène (charge d'oxygène par kg DBO_5 à l'entrée)	(kg/kg)
C_s	concentration d'oxygène saturé	(mg/l)
C_x	teneur en oxygène requise	(mg/l)
O_{DBO}	consommation spécifique d'oxygène requise pour la dégradation de DBO_5 , rapportée à la DBO_5	(kg/kg)
O_N	consommation spécifique d'oxygène requise pour oxyder les composés de l'azote, rapportée à la DBO_5	(kg/kg)
f_C, f_N	facteurs de pointe de la charge en carbone (f_C) et en azote (f_N) pour couvrir des pointes de 2 heures par 24 heures: ces deux facteurs devraient si possible être déterminés par des mesurages. En l'absence de données précises, on utilise les facteurs de pointe du tableau A3.3-1 [25]:	

Facteurs de pointe	Âge des boues (d)					
	4	6	8	10	15	25
f_c	1.3	1.25	1.2	1.2	1.15	1.1
f_N pour < 20'000 EH	—	—	—	2.2	2.0	1.5
f_N pour > 100'000 EG	—	—	2.0	1.8	1.5	—

Tableau A3.3-1
Facteurs de pointe pour la charge en carbone et en azote [25]

La **consommation d'oxygène requise pour dégrader les** composés organiques du carbone (ODBO) est fonction de la température des eaux usées et de l'âge des boues (tableau A3.3-2).

O _{DBO} (kg/kg) Température des eaux usées	Âge des boues (d)					
	4	6	8	10	15	25
10°C	0.83	0.95	1.05	1.15	1.32	1.55
12°C	0.87	1.00	1.10	1.20	1.38	1.60
15°C	0.94	1.08	1.20	1.30	1.46	1.60
18°C	1.00	1.17	1.30	1.40	1.54	1.60
20 °C	1.05	1.22	1.35	1.45	1.60	1.60

Tableau A3.3-2
Consommation spécifique d'oxygène ODBO requise pour dégrader la DBO₅ [25]

Âge minimal des boues (d)	Capacité de la STEP	
	jusqu'à 20'000 EH	supérieure à 100'000 EH
Qualité d'épuration requise		
Épuration sans nitrification	5	4
Épuration avec nitrification (température de dimensionnement: 10°C)	10	8
Épuration avec nitrification et dénitrification (température: 10%) V_D / V_{BA} = 0.2	12	10
= 0.3	13	11
= 0.4	15	13
= 0.5	18	16
Épuration avec nitrification Dénitrification et stabilisation des boues	25	non recommandée

Tableau A3.3-3
Âge minimal des boues [25]

Le tableau A3.3-3 donne l'âge minimal des boues en fonction de la qualité d'épuration requise et de la dimension de la STEP. Pour que la nitrification soit stable à 12°C la température doit être de 10°C.

VBA Volume utile du bassin à boues activées (m³)

VD Part de ce volume affectée à la dénitrification (m³)

La consommation d'oxygène requise pour oxyder les composés de l'azote s'obtient à partir de la quantité de N-NO₃ (charge de nitrate), en tenant compte de la part de N-NO₃ soumise à dénitrification:

Qualité d'épuration requise	Consommation spécifique d'oxygène O _N (en kg O ₂ / kg DBO ₅)
Nitrification	$4.6 \times \text{NO}_3^- \text{ -N} / C_{d\text{DBO}}$
Nitrification et dénitrification	
- pour la part nitrifiée uniquement	$4.6 \times \text{NO}_3^- \text{ -N} / B_{d\text{DBC}}$
- pour la part nitrifiée et dénitrifiée	$1.7 \times \text{NO}_3^- \text{ -N} / C_{d\text{DBO}}$

Tableau A3.3-4

Consommation spécifique d'oxygène requise pour oxyder les composés de l'azote [25]

NO₃ - N charge de nitrate (kg NO₃ - N/d)

B_{dDBO5} charge de DBO₅ (kg DBO₅/d)

Selon la qualité d'épuration requise, la concentration d'oxygène (Cx) dans le bassin à boues activées sera la suivante:

Qualité d'épuration requise	Concentration d'oxygène Cx (mg/l)
sans nitrification	2
avec nitrification	2
avec nitrification et dénitrification simultanée	0.5

Tableau A3.3-5

Concentration d'oxygène dans le bassin à boues activées

A4 Dispositions légales

(Données OFEFP)

1.3

Liste des principales lois et ordonnances sur la protection des eaux
(RS = Recueil systématique du droit fédéral)

1.3.1 Lois fédérales

RS 101	Constitution fédérale du 29 mai 1874; modification des art. 24bis, 24quater (économie des eaux, 1976) et de l'art. 24septies (protection de l'homme et de son milieu naturel, 1971)
RS 700	LF du 22 juin 1979 sur l'aménagement du territoire (LAT)
RS 814.01	LF du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (Loi sur la protection de l'environnement [LPE])
RS 814.20	LF du 27 janvier 1991 sur la protection des eaux (Loi sur la protection des eaux [LEaux])

1.3.2 Ordonnances du Conseil fédéral

RS 814.013	O du 9 juin 1986 sur les substances dangereuses pour l'environnement (O sur les substances [Osubst]); modification du 16 septembre 1992 (engrais)
RS 814.014	O du 12 novembre 1986 sur les mouvements de déchets spéciaux (ODS)
RS 814.12	O du 9 juin 1986 sur les polluants du sol (Osol)
RS 814.201	O générales sur la protection des eaux du 19 juin 1981 et du 20 octobre 1982
RS 814.22521	O du 8 décembre 1975 sur le déversement des eaux usées
RS 814.226.21	O du 28 septembre 1981 sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les altérer (OPEL)

1.3.3 Directives, Recommandations et Informations

- instructions pratiques pour la protection des eaux dans l'agriculture. Office fédéral de l'agriculture, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, juillet 1994
- Recommandations concernant l'analyse des eaux superficielles en Suisse. Département fédéral de l'intérieur, mai 1982
- Directives concernant l'analyse des eaux usées et des eaux de surface (Indications générales et méthodes d'analyses). Département fédéral de l'intérieur, 28 septembre 1983, 1 ère partie: eaux usées; 2ème partie: eaux de surface.
- Directives sur la formation professionnelle du personnel des stations d'épuration. Département fédéral de l'intérieur, 15 novembre 1985
- Informations concernant la protection des eaux N° 2 (1991): Contrôle des stations d'épuration des eaux; installations d'hygiénisation des boues d'épuration liquides
- Informations concernant la protection des eaux N° 4 (1991): Contrôle des stations d'épuration des eaux; les formulaires pour le transfert des données entre la station d'épuration, le canton et la Confédération
- Informations concernant la protection des eaux N° 3 (1991, complété en 1993): Contrôle des stations d'épuration des eaux; les PC (version 3.0) pour le transfert des données entre la station d'épuration, le canton et la Confédération



A5 Cahier des charges



Cahier des charges pour les analyses sommaires et détaillés

Mandants

Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Office fédéral des questions conjoncturelles (OFQC)

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)

Partie I	Renseignement à l'intention des utilisateurs	230
Partie II	Cahier des charges	232
	1. Canalyse sommaire	232
	2. L'analyse détaillée	233
Partie III	Données de base	236

Réalisé par le groupe de travail

CUB
Holinger AG
K.Schweizer AG

Zürich/Bern/Basel, 19. Mai 1994

Partie I

Renseignements à l'intention des utilisateurs

1. But de l'optimisation énergétique et du cahier des charges

L'optimisation énergétique d'une STEP a pour but d'économiser le maximum d'énergie et d'utiliser les agents énergétiques qui y sont produits (à commencer par le gaz de digestion) avec un maximum d'efficacité (haute valeur énergétique, rendement moyen élevé). Il s'agit de mettre en œuvre toutes les mesures d'économie d'énergie dont la rentabilité est incontestable, tant au niveau de l'exploitation qu'au niveau de l'économie globale de la commune. Il convient toutefois de veiller à ce que :

- la qualité d'épuration requise soit assurée;
- les dispositions légales soient respectées;
- la sécurité et l'exploitation de la STEP soient garanties.

L'objectif du cahier des charges consiste à déterminer de façon aussi uniforme et précise que possible les tâches et les données de base nécessaires pour procéder à une analyse énergétique. Ce document garantit au maître de l'ouvrage que les spécialistes mandates pour effectuer une analyse sommaire ou détaillée procéderont de façon que :

- les objectifs énergétiques fixés soient atteints;
- les exigences techniques les plus récentes soient respectées;
- les possibilités d'économie d'énergie soient toutes prises en compte;
- les coûts ne soient pas majorés par des dépenses inutiles.

Quant au spécialiste, il est assuré que l'exploitant lui fournira tous les documents nécessaires et que le maître de l'ouvrage ne posera pas d'exigences qui dépassent les limites, voire le cadre d'une analyse énergétique.

2. Différentes phases d'une optimisation énergétique

L'optimisation énergétique comprend quatre phases :

- l'analyse sommaire
- l'analyse détaillée
- la rénovation
- le contrôle de fiabilité

Détermination de la situation de départ

La différence entre l'analyse sommaire et l'analyse détaillée se situe au niveau du degré d'exactitude. Pour la seconde, qu'il s'agisse d'une construction nouvelle, d'une transformation ou d'une rénovation générale, il convient de bien définir la situation de départ avec le maître de l'ouvrage (quelles composantes doivent de toute manière être remplacées, quelles seront les nouvelles valeurs de dimensionnement, etc.) L'analyse détaillée est exclusivement d'ordre énergétique. Toute étude dépassant ce cadre doit faire l'objet d'un autre mandat, même si ce dernier est attribué à la même personne.

Objectif de l'analyse sommaire

L'analyse sommaire consiste à évaluer la qualité énergétique d'une STEP de façon grossière. Elle révèle notamment

s'il est nécessaire de procéder à des études supplémentaires. Sur la base des recommandations faites par l'ingénieur à l'issue de l'analyse sommaire, le maître de l'ouvrage décide des étapes suivantes et planifie les dépenses nécessaires pour l'analyse détaillée et pour les mesures immédiates.

Objectif de l'analyse détaillée

L'analyse détaillée a pour but de proposer au maître de l'ouvrage un paquet de mesures d'économie d'énergie et de lui indiquer les économies réalisables grâce à la mise en œuvre de chacune d'elles, de même que les coûts ainsi occasionnés et la rentabilité post-rénovation. Les mesures d'économie d'énergie doivent être réparties en fonction des trois étapes de la rénovation (mesures immédiates, mesures à court terme et mesures à prendre avec d'autres dans le cadre d'une rénovation partielle ou globale de la STEP). Les recommandations permettent au maître de l'ouvrage de décider en connaissance de cause s'il veut ou non mettre en œuvre les mesures proposées et, partant, donner mandat à des ingénieurs pour élaborer un projet, puis procéder à la rénovation. Le montant des investissements requis doit être indiqué avec une précision de $\pm 20\%$ pour l'ensemble des mesures et de $\pm 10\%$ pour la consommation d'énergie.

Mise en œuvre des mesures d'économie d'énergie: planification

Le spécialiste chargé d'effectuer l'analyse détaillée ayant pour mandat de proposer des mesures immédiates et des mesures à court terme qui soient rentables, celles-ci doivent toutes être

mises en œuvre, dans un délai d'un à deux ans pour les premières et de deux à trois ans pour les secondes (dans le cadre d'une optimisation énergétique globale). Quant aux mesures à prendre avec d'autres, elles doivent être mises en œuvre dans le cadre d'une rénovation générale des composantes concernées. Les dépenses requises pour la mise en œuvre des mesures immédiates et la planification des mesures à court terme doivent être budgétisées par les services compétents sitôt connus les résultats de l'analyse détaillée.

3. Autres instruments de travail requis pour l'établissement des analyses

Outre le présent cahier des charges, trois autres instruments de travail permettent de mener à bien l'optimisation énergétique d'une STEP, à savoir:

- le manuel «L'énergie dans les stations d'épuration),
- le logiciel conçu à cet effet,
- les analyses modèles [66].

Le cahier des charges se limite à fixer et à délimiter le cadre d'une analyse énergétique et des données de base. La procédure détaillée pour l'accomplissement des différentes tâches y relatives est explicitée dans le manuel «L'énergie dans les stations d'épuration)).

L'ingénieur gagnera beaucoup de temps en utilisant le logiciel [66] conçu expressément pour l'établissement d'analyses énergétiques.

Le cahier des charges contient une liste détaillée des exigences requises pour établir les analyses sommaire et détaillée. A titre d'illustration, le spécialiste se référera aux analyses modèles [66].

Partie II

Cahier des charges

1. L'analyse sommaire

1.1 Données et prestations devant être fournies par le maître de l'ouvrage

1.1.1 Données générales

- Adresse et description de l'objet du mandat
- Propriétaire et exploitant de la STEP
- Personne de référence
- Données énergétiques existantes (études, avant-projets relatifs à des mesures isolées, etc.)
- Année de construction de la STEP
- Nombre d'habitants raccordés
- Plan de situation de la STEP (1500, p. ex.)

1.1.2 Modifications prévues

- Projets de rénovation générale et énergétique
- Projets d'agrandissement, de transformation, d'adjonction de nouveaux procédés, etc.
- Modification du volume et de la qualité des eaux usées: évolution probable

1.1.3 Données consignées dans les rapports d'exploitation

(Valeurs mensuelles de l'année précédente et données annuelles, si possible des trois dernières années: figurent généralement dans les rapports d'exploitation)

- Consommation d'électricité et de combustibles, coûts
- Autoproduction d'énergie électrique et thermique
- Distribution éventuelle de gaz de digestion, d'électricité et d'énergie thermique au réseau ou à des tiers
- Débit d'eaux usées

- Température des eaux usées
- Production et utilisation de gaz de digestion
- Charge effective (DBO_5)

1.1.4 Données techniques relatives à la STEP

- Schéma donnant une vue d'ensemble des procédés d'épuration
- Dimensionnement (débit par temps sec, nombre d'habitants raccordés, équivalents habitants hydrauliques et biologiques)
- Système d'élimination des boues actuel et futur

1.1.5 Données techniques relatives aux consommateurs et producteurs d'énergie

- Principaux consommateurs d'électricité (puissance, âge, etc.)
- Principales installations de production d'énergie: installations de combustion, installations CCF, accumulateurs, etc. (puissance, âge, effluents gazeux dégagés, etc.)
- Conformité avec les prescriptions de l'OPair

1.1.6 Visite sur place avec l'exploitant

- Etat des principaux consommateurs et producteurs d'énergie
- Carences d'ordre énergétique et général
- Documents relatifs à la consommation d'énergie et aux heures d'exploitation (données quotidiennes ou hebdomadaires relevées pour chaque composante)
- Mise en place des appareils de mesure requis par l'ingénieur et mesurages effectués par l'exploitant

1.2 Tâches devant être remplies par le spécialiste

Pendant la visite:

- Prendre note des carences signalées par l'exploitant
- Dresser la liste des carences des plus gros consommateurs d'énergie
- Déterminer les mesures immédiates

Calcul

- Consommation totale d'énergie électrique et thermique
- Quantité de gaz de digestion utilisé pour produire de l'énergie électrique, mécanique et thermique
- Comparaison avec les critères d'évaluation sommaire (cf. manuel «L'énergie dans les stations d'épuration», ch. 75.2)
- Estimation des coûts et des économies occasionnés par les mesures immédiates

Recommandations

- Étapes suivantes: nécessité ou non de procéder à une analyse détaillée
- Coûts engendrés par l'analyse détaillée et date à laquelle elle doit être effectuée
- Énumération des mesures immédiates

1.3 Rapport

Les résultats de l'analyse détaillée doivent faire l'objet d'un rapport rédigé conformément aux exemples types [66]. Après la visite des lieux, le spécialiste discute avec l'exploitant des résultats intermédiaires, de l'évaluation et des mesures immédiates. Les résultats du rapport final sont présentés au maître de l'ouvrage au cours d'une séance.

2. L'analyse détaillée

2.1 Données et prestations devant être fournies par le maître de l'ouvrage

2.1.1 Données générales

- Adresse et description de l'objet du mandat
- Propriétaire et exploitant de la STEP
- Personne de référence
- Description précise de l'état général de la STEP
- Contrôle des appareils de mesure (installation, relevé)
- Données énergétiques existantes (analyse sommaire, mesures isolées, etc.)
- Année de construction de la STEP
- Nombre d'habitants raccordés
- Plan de situation de la STEP (1:500, p. ex.)
- Plans des locaux dépassant 500 m² de surface de référence énergétique (1:50) dont le chauffage est assuré en grande partie par de l'énergie externe (mazout, etc.)
- Plans d'exécution de toute la STEP

2.1.2 Modifications prévues

- Projets de rénovation générale et énergétique
- Projets d'agrandissement, de transformation, d'adjonction de nouveaux procédés, etc.
- Modification du volume et de la qualité des eaux usées: évolution probable

2.1.3 Données consignées dans les rapports d'exploitation

(Valeurs mensuelles des deux années précédentes et données annuelles, si possible des cinq dernières années: figurent généralement dans les rapports d'exploitation)

- Consommation d'électricité et de combustibles, coûts
- Autoproduction d'énergie électrique et thermique
- Distribution éventuelle de gaz de digestion, d'électricité et d'énergie thermique au réseau ou à des tiers
- Débit d'eaux usées
- Température des eaux usées
- Production et utilisation de gaz de digestion
- Charge effective (DBO_5)
- Apport d'oxygène

2.1.4 Données techniques relatives à la STEP

- Schéma donnant une vue d'ensemble des procédés d'épuration
- Schéma des conduites et des systèmes de distribution
- Systèmes de régulation
- Profil hydraulique longitudinal
- Dimensionnement (débit par temps sec, nombre d'habitants raccordés, équivalents habitants hydrauliques et biologiques)
- Système d'élimination des boues actuel et futur

2.1.5 Données techniques relatives aux consommateurs et producteurs d'énergie

- Principaux consommateurs d'électricité (puissance, âge, etc.)
- Principales installations de production d'énergie: installations de combustion, installations CCF, accumulateurs, etc. (puissance, âge, effluents gazeux dégagés, etc.)
- Conformité avec les prescriptions de l'OPair

2.1.6 Visite sur place avec l'exploitant

- État des principaux consommateurs et producteurs d'énergie
- Carences d'ordre énergétique et général
- Documents relatifs à la consommation d'énergie et aux heures d'exploitation (données quotidiennes ou hebdomadaires relevées pour chaque composante)
- Exécution et contrôle des mesurages supplémentaires

2.2 Tâches devant être remplies par le spécialiste

2.2.1 État général de la STEP

- Recensement des principaux consommateurs d'énergie (env. 95% de la consommation totale) classés par composantes d'installations (étapes d'épuration) dans l'ordre de passage des eaux
- Brève description des carences et de leurs incidences énergétiques, ainsi que d'éventuelles mesures d'entretien, de remise en état ou d'amélioration du confort
- Données sur la consommation d'énergie (GJ/a) calculée à partir de la puissance effective (kW) et de mesurages ou d'estimations du nombre d'heures d'exploitation (h/a)
- Numérotation et répartition des mesures dans l'un ou l'autre des trois paquets
- Bilans énergétiques de l'état général établis par composante pour l'énergie électrique et thermique
- Besoins électriques et thermiques couverts par le gaz de digestion

2.2.2 Paquets de mesures

- Énumération des mesures isolées classées par catégorie (mesures immédiates, mesures à court terme et mesures à prendre avec d'autres) et en fonction des composantes d'installations
- Économies d'énergie réalisables dans le domaine électrique et dans le domaine thermique
- Investissements globaux et investissements liés aux mesures énergétiques (kfrs)
- Durée d'utilisation (années)
- Frais annuels liés aux investissements énergétiques avec annuité
- Rendement annuel, compte tenu du renchérissement de l'énergie
- Rapport coût-efficacité (investissements énergétiques, renchérissement de l'énergie inclus)

2.2.3 Bilans

A présenter sous forme de tableaux et de graphiques pour l'état général et après mise en œuvre des paquets de mesures M_i , M_i+M_{ct} , $M_i+M_{ct}+M_a$.

Énergie:

- Consommation électrique, thermique et totale
- Économies (en chiffres absolus et en pour cent)
- Bilans énergétiques de l'état général et visé (après $M_i+M_{ct}+M_a$)

Rentabilité:

- Investissements (globaux et énergétiques)
- Frais annuels, rendement annuel, rapport coût-efficacité

Recommandations:

- Paquets de mesures par étape de rénovation
- Déroulement des opérations et estimation des coûts

2.3 Rapport

Les résultats de l'analyse détaillée doivent faire l'objet d'un rapport rédigé conformément aux exemples types [66]. Après la visite des lieux, le spécialiste discute avec l'exploitant des résultats intermédiaires, de l'évaluation et des mesures immédiates. Les résultats du rapport final sont présentés au maître de l'ouvrage au cours d'une séance.

Le spécialiste s'assure que les mesures d'économie d'énergie proposées sont intégrées au projet et procède au contrôle de fiabilité. Ce dernier n'est pas inclus dans le mandat et fait l'objet d'une facture séparée.

Partie III Données de base

1. Les unités

Puissance:	watts	(W)
Travail (consommation d'énergie):	joules	(J)
- Pression:	pascals	(Pa)
Température,	Celsius	(°C)
Intervalle de température,	Kelvin	(K)

Unités de consommation d'énergie pour les différents agents énergétiques,

Pour le gaz naturel, on utilise la valeur supérieure du pouvoir calorifique, alors que pour les agents énergétiques fossiles, c'est la valeur inférieure qui est employée.

Mazout	kg ou J	(conversion: 1 kg = 42,7 MJ) ([à éviter] 1 l = 0,84 kg)
Gaz naturel:	kWh ou J	(conversion: $P_d = 0,90 \times P_{cs}$)
Gaz de digestion:	kWh ou J	(conversion: 1 m ³ = env. 23 MJ)
Électricité:	kWh ou J	(conversion: 1 kWh = 3,6 MJ)

2. La rentabilité

(Rapport coût-efficacité)

L'évaluation des coûts ne peut en aucun cas se limiter à celle des investissements; le critère décisif est la rentabilité, qui se calcule à partir du rapport coût-efficacité et de l'annuité, selon la recommandation SIA 380/1: il s'agit de mettre en balance la totalité des frais annuels moyens engendrés par une mesure pendant la durée d'utilisation prévue et le rendement annuel global.

Coûts:

- Annuité des investissements énergétiques
- Frais de maintenance et d'entretien (personnel supplémentaire ou plus sollicité, frais annexes, etc)

Rendement:

- Économies d'énergie réalisées
- Éventuelles autres économies induites au niveau de l'exploitation

Les frais liés aux investissements énergétiques sont déterminés par l'annuité sur la base d'un taux d'intérêt donné (exemple: le taux hypothécaire fixé par les banques cantonales pour les travaux publics) et de la durée d'utilisation des composantes nouvelles ou modifiées. Le calcul de rentabilité ne portant que sur les mesures d'économie d'énergie. Il convient de prendre en compte unique

ment les investissements occasionnés par ces mesures et non les dépenses engendrées par la planification, la construction, l'acquisition d'installations, la mise en service, etc., pas plus que par l'entretien, la remise en état ou l'amélioration d'une machine, ni par les mesures requises pour satisfaire aux exigences légales. Ainsi, lorsqu'une pompe doit être remplacée pour raison d'usure, seule la part supplémentaire occasionnée par l'installation d'un moteur à faible consommation d'énergie sera prise en compte. S'il devait arriver qu'une composante soit remplacée pour des raisons purement énergétiques avant le terme de sa durée d'utilisation, sa valeur résiduelle serait alors prise en compte dans le calcul des coûts énergétiques.

Les investissements énergétiques ayant une longue durée d'amortissement, le calcul de rentabilité doit être opéré en tenant compte de l'évolution des prix de l'énergie à long terme. C'est la raison pour laquelle, dans l'analyse du rapport coût-efficacité, ces derniers sont multipliés par le facteur de correction moyen (mén), exprimant le renchérissement de l'énergie. La recommandation SIA 380/1 table sur un renchérissement nominal annuel de 5% et sur un renchérissement réel de l'énergie de 1%.

Pour ce qui est du rendement, il n'a été tenu compte que des économies liées à l'exploitation au sens étroit du terme. Or, les pouvoirs publics profitent de la totalité du rendement économique, une baisse de la pollution environnementale entraînant une réduction des coûts de la santé, une augmentation de la production agricole (meilleure croissance végé-

taile), ou encore une dégradation moins importante des bâtiments. Cet élément doit donc entrer dans le cadre d'une analyse de rentabilité. La brochure «RAVEL, une économie d'argent») [15] montre que la part quantifiable des coûts économiques peut être obtenue par simple majoration du prix de l'énergie.

$$\frac{F_a}{N} = \frac{F_i + (F_m \times m_m)}{(N_{én} \times m_{én}) + (N_{ex} \times m_{ex})}$$

$$F_i = I_e \times a$$

F_a	frais annuels	(frs/a)
F_i	frais annuels liés aux investissements énergétiques	(frs/a)
F_m	frais annuels de maintenance et d'entretien	(frs/a)
m_m	facteur de correction moyen du renchérissement de la maintenance et de l'entretien	
N	rendement annuel	(frs/a)
$N_{én}$	économies d'énergie annuelles	(frs/a)
N_{ex}	économies annuelles au niveau de l'exploitation	(frs/a)
$m_{én}$	facteur de correction moyen du renchérissement de l'énergie	
m_{ex}	facteur de correction moyen du renchérissement des frais d'exploitation	
I_e	investissements énergétiques	
a	facteur d'annuité	

En règle générale, la durée d'utilisation est déterminée par deux paramètres (construction et techniques) pour les composantes spécifiques à la STEP et aux bâtiments. Dans certains cas toute-

fois, et pour des mesures d'économie d'énergie importantes, elle doit être plus différenciée (cf. recommandation SIA 380/1).

	Composantes spécifiques à la STEP			Composantes spécifiques aux bâtiments		
	Durée d'utilisation	Facteur de correction moyen	Annuité*	Durée d'utilisation	Facteur de correction moyen	Annuité*
Construction/ Technique	25 années	1,8	0,078	30 années	2,0	0,073
	12,5 années	1,4	0,116	15 années	1,5	0,103

* Intérêt: 6%

3. Les prix de l'énergie

- Mazout:	prix du marché (moyenne calculée sur le long terme)
- Gaz:	tarif actuel du fournisseur
- Électricité:	tarif actuel du fournisseur
- Eau:	tarif actuel du fournisseur
- Renchérissement de l'énergie:	tarif actuel multiplié par le facteur de correction moyen selon SIA 3800

4. Les données climatiques

Ces éléments se trouvent dans la recommandation SIA 380/1.

5. Exigences énergétiques posées aux bâtiments

Chauffage des bâtiments:	Électricité:
- Établissement d'un bilan énergétique annuel selon SIA 380/1	- Mode de calcul selon SIA 380/4 (en consultation)
- Exigences énergétiques selon SIA 380/1	- Exigences énergétiques selon SIA 380/4
- Valeurs comparatives: valeurs actuelles et valeurs cibles pour les rendements résiduels selon SIA 380/1	- Valeurs comparatives: valeurs actuelles et valeurs cibles selon SIA 380/1

6. Exigences énergétiques posées aux STEP

Les STEP ne sont, pour l'heure, pas soumises à des exigences énergétiques telles qu'elles ont été posées pour les bâtiments. Cependant, le manuel «L'énergie dans les stations d'épuration» énonce des critères d'évaluation sommaire et détaillée qu'il convient de respecter. Leur non-respect doit être dûment motivé.

7. Rapport coût-efficacité

Investissements: distinguer les frais globaux des frais énergétiques. Tenir compte des frais annexes et induits (honoraires, etc.). Calculer l'ensemble de ces frais avec une précision de $\pm 20\%$ permettant d'évaluer la rentabilité des paquets de mesures.

Frais de maintenance et d'entretien : prendre en compte les frais de personnel (maintenance interne et service externe) et les frais annexes (lubrifiants, pièces de rechange, énergies d'appoint), à moins que leur montant soit équivalent pour les différentes variantes.

Rendement: à calculer sur la base des économies d'énergie, compte tenu des prix de l'énergie et de leur renchérissement (point 3).

8. Répartition des paquets de mesures par étape de rénovation

- Mesures immédiates (Mi)
 - bon rapport coût-efficacité (inférieur à 0,3) ou adaptation urgente aux prescriptions légales (OPair, qualité de l'épuration) ou réparation (en cas de pertes, p. ex.);
 - pas d'incidence négative sur les mesures qui seront prises ultérieurement;
 - pas de problèmes pour l'exploitation, le traitement des eaux, la physique des constructions et les techniques.
- Mesures à court terme (Mct):
 - rapport coût-efficacité équilibré (environ 1,0, facteur de correction moyen pour le renchérissement de l'énergie selon SIA 380/1 inclus pour le paquet composé des mesures immédiates et des mesures à court terme);
 - pas de mesures immédiates ni de mesures à prendre avec d'autres.
- Mesures à prendre avec d'autres (Ma)
 - mauvais rapport coût-efficacité ou autres facteurs impliquant leur mise en œuvre uniquement dans le cadre d'une rénovation générale.

Bibliographie

- [1] Verband Schweizerischer Abwasserfachleute (VSA):
Energieprobleme in Kläranlagen: Weiterbildungskurs für Klärwärter,
Hünigen bei Konolfingen, 1985
- [2] Verband Schweizerischer Abwasserfachleute (VSA):
Klarwerkpersonal-Ausbildung:
Betriebsführung, Energietechnik, Unfallverhütung,
Zürich, 1991
- [3] Office fédéral des questions conjoncturelles:
Programme d'impulsion pour l'amélioration thermique des bâtiments,
Manuel «Etudes et Projet»
Berne, 1985
- [4] Office fédéral des questions conjoncturelles:
Amélioration thermique des bâtiments:
expériences pratiques,
Berne, 1985
- [5] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA):
SIA Recommandation 380/1,
L'énergie dans le bâtiment,
Zurich, 1988
- [6] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA):
SIA Recommandation 380/4
L'énergie électrique dans le bâtiment,
Zurich, 1995
- [7] Office fédéral des questions conjoncturelles:
L'électricité à bon escient,
RAVEL,
Berne, 1992
- [8] C.U. Brunner, E.A. Müller:
Energie in Abwasserreinigungsanlagen (ARA),
Schriftenreihe Nr. 12 der Expertengruppe Energieszenarien,
Bern/Zürich, 1987
- [9] C.U. Brunner, E.A. Müller:
Nutzungsmöglichkeiten der Wärme im Abwasser von Kläranlagen,
Studie Nr. 39 der Schriftenreihe des BEW,
Bern/Zürich, 1986

- [10] E.A. Müller:
Externe Wärmenutzung aus Klaranlagen;
im Auftrag Bundesamt für Energiewirtschaft, Energie 2000, Aktionsgruppe
Regenerierbare Energien,
Zürich, 1993
- [11] B. Eggen:
Abwärmenutzung ARA Thun,
Bern, 1994
- [12] M. Graf:
Projektstudie des Warmeverbundes Augarten Rheinfelden,
Basel, 1994
- [13] Ch. Belaz, C. Adam:
Energetische Grobanalyse der Klaranlagen im Kanton Aargau,
Baden, 1989
- [14] G. Togni, B. Hösli:
Warmepotential aus ARA und KVA,
Zürich, 1991
- [15] A. Müller, F. Walter:
RAVEL, une économie d'argent,
Guide pratique pour les calculs de rentabilité,
Office fédéral des questions conjoncturelles,
Berne, 1992
- [16] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage:
Redevances sur les eaux usées,
La protection des eaux N° 11,
Berne, 1993
- [17] Schweizerischer Städteverband, Fachorganisation für Entsorgung
und Strassenunterhalt:
Musterbetriebskostenrechnung Abwasseranlagen,
Bern, 1991
- [18] Verband Schweizerischer Abwasserfachleute, Schweizerischer Städte-
verband:
Finanzierung der Abwasserentsorgung,
Zürich/Bern, 1994
- [19] U. Kaufmann, Y. Fang, H. Pauli:
Klein-WKK-Statistik Schweiz der Jahre 1980 - 1991,
im Auftrag Bundesamt für Energiewirtschaft,
Basel, 1991
- [20] E. Nussbaumer, P. Hess, Ch. Rubitschung:
Initialisierung von Anlagen für die Stromproduktion in Klaranlagen,
Liestal, 1994

- [21] Office fédéral des questions conjoncturelles, OFQC
Petites centrales hydrauliques, PACER
Berne. 1993
- [22] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage:
Statistique portant sur la protection des eaux,
Berne, 1985
- [23] J.E. Albrecht:
Anleitung für den sorgsam Umgang mit Trinkwasser,
im Auftrag des Hochbauinspektorates der Stadt Zürich,
Zürich, 1989
- [24] P. Haldimann, W. Stegemann:
Retention und Versickerung von Meteorwasser im Liegenschaftsbereich,
im Auftrag des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau Kanton Zürich,
Zürich 1991
- [25] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV):
ATV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Arbeitsblatt A 131
Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten
Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA)
St. Augustin, 1991
- [26] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV):
Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik
Band IV: Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung
Berlin, 1985 (3.Auflage)
- [27] P. Wolf:
Energieeinsparung auf Klaranlagen
Korrespondenz Abwasser April 1993, Beilage Betriebsinfo 2/1993
St. Augustin, 1993
- [28] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV):
AIV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Hinweis H 265
Regelung der Sauerstoffzufuhr beim Belebungsverfahren
Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA)
St. Augustin, 1991
- [29] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV)
ATV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Hinweis H 259
Auf Klaranlagen Stromkosten sparen
Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA)
St. Augustin, 1988

- [30] Abwassertechnische Vereinigung e.V (ATV):
AIV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Arbeitsblatt A 126
Grundsätze für die Abwasserbehandlung in Kläranlagen nach dem
Belebungsverfahren mit gemeinsamer Schlammstabilisierung bei
Anschlusswerten zwischen 500 und 10 000 Einwohnerwerten
Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA)
St. Augustin, 1987
- [31] Abwassertechnische Vereinigung e.V (ATV):
ATV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Arbeitsblatt A 128
Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungs-
anlagen in Mischwasserkanälen
Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA)
St. Augustin, 1992
- [32] M. Koch, J. Kappler, B. Jost:
Betriebserfahrung mit der Flockungsfiltration im Kanton Zürich
Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV)
ATV-Fachausschuss 31 .1992, Seiten 261 - 289
Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA)
St. Augustin, 1992
- [33] Verband Schweizerischer Abwasserfachleute:
Die Schlammbehandlung, Unfallverhütung
Fachkurs F3 für Kläranlagepersonal, 2. Auflage
Zürich, 1984
- [34] H.J. Pöpel et al:
Belüftungssysteme in der Abwassertechnik 1991
Fortschritte und Perspektiven
1. Gemeinsames Abwassertechnisches Seminar
Schriftenreihe WAR 54
Darmstadt, 1991
- [35] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage:
Incinération des boues d'épuration
Berne, 1991
- [36] A. Melsa:
Stand und Vergleich zeitgemässer Entwässerungstechniken
Verein Deutscher Ingenieure
VDI-Bildungswerk BW 9889
Düsseldorf, 1989
- [37] M. Boller, A. Gross, H. Zimmermann:
Aerob-thermophile Schlammstabilisierung mit Reinsauerstoff
Gas/Wasser/Abwasser Nr. 7 / 1991
Zürich, 1991

- [38] F. Münst:
Wirkungsgradoptimierung der Druckluftherzeugung und -verteilung
Bundesamt für Konjunkturfragen
Materialien zu RAVEL, Ressort 21: Kraft
Bern, 1992
- [39] K. Imhoff:
Taschenbuch der Stadtentwässerung (27. Auflage)
München, 1990
- [40] M. Koch, J. Kappler, B. Jost:
Weitergehende Nährstoffelimination
Stand und Entwicklung in der Schweiz
4.Karlsruher Flockungstage, 29. - 30.11.1990
Karlsruhe, 1990
- [41] A. Stein:
Ein Beitrag zur Gestaltung belüfteter Sandfänge
Korrespondenz Abwasser 4/1 992
St. Augustin, 1992
- [42] Abwassertechnische Vereinigung e.V (ATV):
Auswahl und Einsatz von organischen Flockungshilfsmitteln
- Polyelektrolyten - bei der Klärschlammbehandlung
Korrespondenz Abwasser 4/1992
St. Augustin, 1992
- [43] A. Melsa, M. Wessel:
Eindickung von Überschussschlamm
Ergebnisse mit Zentrifugen, Flotation und statischer Eindickung
Korrespondenz Abwasser 11/1 986
St. Augustin, 1986
- [44] R. Denkert:
Die maschinelle Überschussschlammbehandlung mit Zentrifugen
Vorstellung eines Forschungsprojektes
Korrespondenz Abwasser 11 /1986
St. Augustin, 1986
- [45] A. Strohmeier:
Verfahrenskombinationen für zukünftige Anforderungen .
Vortrag gehalten am ATV-Fortbildungskurs: Abwasserreinigung
im Lichte neuer Forderungen
Fulda, 1988
- [46] P. Kunz:
Behandlung von Abwasser
Würzburg, 1990 (2.Auflage)

- [47] E. Blitz, W. Czysz:
Abwassertechnologie
Entstehung, Ableitung, Behandlung, Analytik der Abwasser
Berlin, 1988
- [48] F. Bischof:
Möglichkeiten einer optimierten Belüftung:
Theoretische Ansätze und praktische Lösungsvorschläge,
Lehrstuhl für Stromungsmechanik, Universität Erlangen
Nürnberg, 1993
- [49] W. Gujer:
Nitrifikation in Belebungsanlagen
Verband Schweizerischer Abwasserfachleute
Verbandsbericht Nr. 310
Zürich, 1986
- [50] P. Stähli:
Elektrosparstudie ARA Birs II
Basel, 1988
- [51] Dr. Ing. H. Rentzsch:
Handbuch für Elektromotoren: BBC-Fachbuchreihe,
Verlag W. Girardet
Essen, 1980
- [52] K. Reichert, R. Neubauer, H. Reiche, F. Berg:
RAVEL: Elektrische Antriebe energieoptimal auslegen und betreiben
EDMZ-Best-Nr. 724 331 d
Im Auftrag des Bundesamtes für Konjunkturfüragen
Zürich, 1993
- [53] F. Berg:
Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad,
Bulletin SEV/VSE Nr. 4/1987
Dietikon, 1987
- [54] A. Neyer, W. Seidinger:
Grundlagen für Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte
bei elektrischen Antrieben.
Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft.
Zürich, 1992
- [55] J.F. Grieder:
Bau- und Ausführungsprojekt ARA Rodersdorf
Oberwil, 1987/88
- [56] E. Michel und E. Schmitz:
Energieoptimierung und Energieerzeugung in Kläranlagen,
Kompetenz in der Wasserwirtschaft,
Siemens-Schriftenreihe Folge 9

- [57] Richtwerte Schweiz. Lichttechnische Gesellschaft (SLG)
Postgasse 17
Berri
- [58] J. Nipkow:
Stromsparende Betriebseinrichtungen für Büro- und Geschäftshauser,
Herausgeber: Zürcher Energieberatung
Zürich, 1992
- [59] P. Thurnherr:
Handbuch Rohrbegleitheizungen
Basel, 1992
- [60] P. Beuth, Dipl.-Ing.:
Redox-Regelung, kostengünstige Alternative zur Nitratsteuerung
Abwassertechnik - Heft 6/1991
Aarbergen, 1991
- [61] Office fédéral de l'énergie
Energie solaire et météorologie, Notion de base,
Infosolar
Berne, 1985
- [62] R. Contini Knobel et al:
Office fédéral des questions conjoncturelles:
Soleil et architecture - Guide pratique pour le projet,
Materialien zu Impulsprogramm PACER
Bern, 1992
- [63] D. Müller, M. Moser, R. Thommen:
Projektstudie: Photovoltaik auf der ARA Ergolz 1, Sissach
Amt für Industrielle Betriebe, Kanton Basel-Landschaft
Liestal. 1991
- [64] R. Thommen, P. Stahli:
Energetische Muster-Feinanalyse an der Klaranlage Weinfelden,
Liestal/Basel, 1994
- [65] B. Kobel, A. Baumgartner, et al:
Energetische Muster-Feinanalyse an der Klaranlage Worblental,
Bern/Zürich, 1994
- [66] E.A. Müller, R. Thommen, P. Stähli, B. Kobel, A. Baumgartner, et al:
"Materialien" zum Handbuch Energiesparmassnahmen in Abwasser-
reinigungsanlagen,
Zürich/Bern/Basel 1994

- [47] E. Blitz, W. Czyst:
Abwassertechnologie
Entstehung, Ableitung, Behandlung, Analytik der Abwasser
Berlin, 1988
- [48] F. Bischof:
Möglichkeiten einer optimierten Belüftung:
Theoretische Ansätze und praktische Lösungsvorschläge,
Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen
Nürnberg, 1993
- [49] W. Gujer:
Nitrifikation in Belebungsanlagen
Verband Schweizerischer Abwasserfachleute
Verbandsbericht Nr. 310
Zürich, 1986
- [50] P. Stähli:
Elektrosparstudie ARA Birs II
Basel, 1988
- [51] Dr. Ing. H. Rentzsch:
Handbuch für Elektromotoren: BBC-Fachbuchreihe,
Verlag W. Girardet
Essen, 1980
- [52] K. Reichert, R. Neubauer, H. Reiche, F. Berg:
RAVEL: Elektrische Antriebe energieoptimal auslegen und betreiben
EDMZ-Best-Nr. 724 331 d
Im Auftrag des Bundesamtes für Konjunkturfüragen
Zürich, 1993
- [53] F. Berg:
Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad,
Bulletin SEV/VSE Nr. 4/1 987
Dietikon, 1987
- [54] A. Neyer, W. Seidinger:
Grundlagen für Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte
bei elektrischen Antrieben.
Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft.
Zürich, 1992
- [55] J.F. Grieder:
Bau- und Ausführungsprojekt ARA Rodersdorf
Oberwil, 1987/88
- [56] E. Michel und E. Schmitz:
Energieoptimierung und Energieerzeugung in Kläranlagen,
Kompetenz in der Wasserwirtschaft,
Siemens-Schriftenreihe Folge 9

- [57] Richtwet-te Schweiz. Lichttechnische Gesellschaft (SLG)
Postgasse 17
Bern
- [58] J. Nipkow:
Stromsparende Betriebseinrichtungen für Büro- und Geschäftshäuser,
Herausgeber: Zürcher Energieberatung
Zürich, 1992
- [59] P. Thurnherr:
Handbuch Rohrbegleitheizungen
Basel , 1992
- [60] P. Beuth, Dipl.-Ing.:
Redox-Regelung, kostengünstige Alternative zur Nitratsteuerung
Abwassertechnik - Heft 6/1991
Aarbergen, 1991
- [61] Office fédéral de l'énergie
Energie solaire et météorologie, Notion de base,
Infosolar
Berne, 1985
- [62] R. Contini Knobel et al:
Office fédéral des questions conjoncturelles:
Soleil et architecture - Guide pratique pour le projet,
Materialien zu Impulsprogramm PACER
Bern, 1992
- [63] D. Müller, M. Moser, R. Thommen:
Projektstudie: Photovoltaik auf der ARA Ergolz 1, Sissach
Amt für Industrielle Betriebe, Kanton Basel-Landschaft
Liestal, 1991
- [64] R. Thommen, P. Stahli:
Energetische Muster-Feinanalyse an der Klaranlage Weinfelden,
Liestal/Basel, 1994
- [65] B. Kobel, A. Baumgartner, et al:
Energetische Muster-Feinanalyse an der Klaranlage Worblental,
Bern/Zürich, 1994
- [66] E.A. Müller, R. Thommen, P. Stahli, B. Kobel, A. Baumgartner, et al:
"Materialien" zum Handbuch Energiesparmassnahmen in Abwasser-
reinigungsanlagen,
Zürich/Bern/Basel 1994