

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**COUTS D'INSTALLATION ET DE FONCTIONNEMENT
DES UNITES DE TRAITEMENT ET
DE VALORISATION DES DECHETS
GUIDE DE CALCUL ET ETUDES DE CAS**

***INSTALLATION AND OPERATING COSTS OF WASTE
TREATMENT AND RECOVERY UNITS
CALCULATION GUIDE AND CASE STUDIES***

juillet 2020

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

RECORD, Coûts d'installation et de fonctionnement des unités de traitement et de valorisation des déchets. Guide de calcul et études de cas, 2020, 346 p, n°18-0815/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2020

RESUME

Afin de pouvoir réaliser les analyses technico-économiques pour construire les avant-projets sommaires (APS) de différents procédés de traitement et de valorisation des déchets, eux-mêmes découpés en opérations unitaires, on précise, pour chacun des procédés mis en œuvre, les connaissances préalables nécessaires, ainsi que les procédures d'évaluation des :

- Consommations spécifiques en énergies électrique ou thermique des procédés et équipements associés (SEC, *Specific Energy Consumption*), intervenant dans l'évaluation de leurs OPEX, ainsi que leurs facteurs d'émissions associés en CO₂,
- Coûts d'acquisition de chacun des équipements mis en œuvre (PEC, *Purchase Equipment Costs*), départ usine ou livrés sur site (coûts de transport), intervenant dans l'évaluation des CAPEX. Ces PEC sont donnés sous forme de cas de référence et/ou de lois de corrélations. Les procédures nécessaires concernant l'actualisation (indice CEPCI), ainsi que l'intrapolation ou l'extrapolation de ces coûts sont détaillées,
- Coûts d'installation global (TOT), prenant en compte la détermination d'un facteur de Lang entre le TOT et la somme des PEC des différents équipements de l'installation,
- Des OPEX, prenant en compte les coûts de transport, coûts des matières premières, coûts des bâtiments et voirie, les coûts de maintenance, d'assurance et de personnel, ainsi que les taxes (TGAP),
- Des éléments d'ingénierie financière, pour réaliser les emprunts nécessaires, ainsi que les dotations aux amortissements et l'établissement du compte de résultats.

Ces connaissances préalables, ainsi que ces procédures d'évaluation sont illustrées par de nombreux exemples numériques, sur des cas pratiques.

L'applicabilité des données recueillies et leur analyse est illustrée par l'évaluation des OPEX et CAPEX de différents exemples de filière de traitement/valorisation de déchets.

Ces exemples sont au nombre de quatre, incluant le cas des unités de tri de déchets, des unités de compostage, des unités de méthanisation et des unités d'incinération.

MOTS CLES

Consommations spécifiques (SEC), Coûts d'équipement (PEC), Facteur d'émission CO₂, OPEX, CAPEX, Procédures d'actualisation/extrapolation des PEC, Indice CEPCI, Coûts d'installation, Facteur de Lang. Coûts de transport, frais de maintenance, assurances, coûts de personnel. Emprunts, dotation aux amortissements, compte de résultats. Centre de tri, Unité de compostage, Unité de méthanisation, Unité d'incinération.

SUMMARY

In order to be able to carry out the technical and economic analyzes to build the preliminary projects (APS) of different waste treatment and recovery processes, themselves broken down into unit operations, we specify, for each of the processes implemented, the necessary prior knowledge, as well as the procedures for assessing:

- Specific consumption in electrical or thermal energy of associated processes and equipment (SEC, *Specific Energy Consumption*), involved in the assessment of their OPEX, as well as their associated CO₂ emission factors,
- Acquisition costs of each of the equipment used (PEC, *Purchase Equipment Costs*), ex works or delivered on site (transport costs), involved in the evaluation of CAPEX. These PECs are given in the form of reference cases and / or correlation laws. The necessary procedures concerning the updating (CEPCI index) and the extrapolation / extrapolation of these costs are detailed,
- Total installation costs (TOT), taking into account the determination of a Lang factor between the TOT and the sum of the PECs of the various pieces of equipment in the installation,
- OPEX, taking into account transport costs, raw material costs, building and road costs, maintenance, insurance and personnel costs, as well as taxes (TGAP),
- Elements of financial engineering, to carry out the necessary loans, as well as depreciation, amortization and the establishment of the income statement.

This prior knowledge, as well as these evaluation procedures are illustrated by numerous numerical examples, on practical cases.

The applicability of the data collected and their analysis is illustrated by the evaluation of OPEX and CAPEX of different examples of waste treatment / recovery sector.

There are four examples, including the case of waste sorting units, composting units, anaerobic digestion units and incineration units.

KEY WORDS

Specific consumption (SEC), Equipment costs (PEC), CO₂ emission factor, OPEX, CAPEX, PEC update / extrapolation procedures, CEPCI index, Installation costs, Lang factor. Transport costs, maintenance costs, insurance, personnel costs. Loans, depreciation and amortization, income statement. Sorting center, composting unit, methanization unit, incineration unit.

Le présent rapport a pour objectif principal, de fournir les données technico-économiques et outils de calcul nécessaires à la réalisation d'avant-projets sommaires (APS), portant sur des unités de traitement et de valorisation des déchets, Les procédés industriels concernés y sont décomposés en opérations unitaires, elles-mêmes constituées par l'assemblage de divers équipements.

Ces équipements sont de différentes natures et ont des caractéristiques variées, en particulier en ce qui concerne leurs performances, leurs OPEX (consommations électrique ou thermique, ...), leurs émissions de CO₂ à l'atmosphère, ainsi que concernant leurs coûts d'acquisition et d'installation (CAPEX),

Les consommations spécifiques en énergies électrique ou thermique des différents procédés et équipements associés ont été fournies sous forme de leurs SEC (*Specific Energy Consumption*). Le SEC d'un équipement donné est l'énergie consommée par cet équipement, par kg de matière entrante (J/kg), ou par tonne de matière entrante (kWh/tonne). A des fins de comparaison des consommations entre installations, ces consommations spécifiques (combustibles fossiles, électricité, vapeur, ...), ont été ramenées en énergie primaire.

Dans les cas où l'électricité est prise sur le réseau, ce calcul nécessite l'utilisation d'un coefficient d'équivalence de l'électricité en énergie primaire. En France, ce coefficient d'équivalence, réactualisé en 2020 compte tenu de l'évolution du parc EDF, est égal à 2,3. Cela signifie pour un kWh_e utilisé, on a consommé 2,3 kWh d'énergie primaire.

Le facteur d'émission en CO₂ non renouvelable, associé à la production d'électricité, mise sur le réseau, est aujourd'hui, en France, de : $f_{CO_2} = 0,057 \text{ kg}_{CO_2} / \text{kWh}_e$. Les émissions spécifiques en CO₂ des différents combustibles primaires sont calculées et illustrées sur la base d'exemples numériques (charbon, fuel, gaz naturel, ...).

Afin de réduire la consommation d'un procédé en énergie primaire, on peut récupérer les chaleurs perdues, afin de les fournir à un autre procédé. On parle alors de valorisation des chaleurs fatales. Cette valorisation n'est possible que quand le niveau de température de cette chaleur récupérée est suffisant. En effet, la « qualité » d'une énergie calorifique dépend directement de son niveau de température. Cet état de fait étant quantifié par l'exergie Ex (J), associée à une quantité de chaleur Q, disponible à une température T, la température ambiante étant à T₀. Plus la température T de disponibilité de la chaleur récupérée est proche de T₀, plus son contenu exergetique (fraction mécanisable) est faible, ne justifiant pas l'installation d'une unité de récupération d'énergie.

Il alors est possible de « relever » le niveau de température d'une chaleur fatale, et ce, par thermo-transformation. C'est le cas avec une pompe à chaleur (PAC), celle-ci, consommant cependant de l'électricité, La performance d'une PAC est donnée par son COP, c'est-à-dire son coefficient de performance. Ce coefficient est le ratio entre la puissance thermique chaude que produit la PAC à la puissance électrique consommée pour alimenter les différents organes qui la constitue (compresseur). Le COP technique des PAC fournies par les constructeurs, possède en général, une valeur qui se situe entre 3 et 5, signifiant que, que lorsque l'on a consommé 100 Wh_e pour alimenter la PAC, celle-ci délivre entre 300 Wh_{th} et 500 Wh_{th} à plus haute température. Cependant, compte tenu du coefficient d'équivalence de l'électricité en énergie primaire, pour une consommation électrique de la PAC de 100 Wh_e, on consomme réellement 230 Wh_{th} en énergie primaire, pour fournir entre 300 et 500 Wh_{th}.

The main objective of this report is to provide the technical and economic data and calculation tools necessary for carrying out preliminary projects (APS), in relation with waste treatment and recovery units,

The industrial processes concerned are broken down into unit operations, which themselves consist of the assembly of various equipments.

This equipment is of different types and has various characteristics, in particular with regard to their performance, their OPEX (electrical or thermal consumption, etc.), their CO₂ emissions to the atmosphere, as well as their acquisition costs and installation (CAPEX),

The specific consumption in electrical or thermal energy of the various processes and associated equipments was provided in the form of their SEC (Specific Energy Consumption). The SEC of a given piece of equipment is the energy consumed by this equipment, per kg of the feeding material (J / kg), or per ton of feeding material (kWh / ton). For the purpose of comparing consumptions between installations, these specific consumptions (fossil fuels, electricity, steam, etc.) have been reduced to primary energy.

In cases where electricity is taken from the network, this calculation requires the use of a coefficient of equivalence of electricity as primary energy. In France, this equivalence coefficient, updated in 2020, taking into account the evolution of the EDF fleet, is equal to 2.3. This means that for one kWh_e used, we consumed 2.3 kWh of primary energy.

The non-renewable CO₂ emission factor, associated with the production of electricity, put on the network, is today, in France, of: $f_{CO_2} = 0.057 \text{ kg}_{CO_2} / \text{kWh}_e$. The specific CO₂ emissions of the various primary fuels are calculated and illustrated on the basis of numerical examples (coal, fuel-oil, natural gas, etc.).

In order to reduce the primary energy consumption of a process, we can recover the waste heat, in order to supply it to another process. We then speak of valorization of fatal heat. This recovery is only possible when the temperature level of this recovered heat is sufficient. Indeed, the "quality" of a calorific energy depends directly on its temperature level. This state of affairs is quantified by the exergy Ex (J), associated with a quantity of heat Q, available at a temperature T, the ambient temperature being at T₀. The closer the temperature T of availability of the recovered heat is to T₀, the lower is its exergy content (mechanizable fraction),

In these cases, the installation of an energy recovery unit is not justified.

It is then possible to "raise" the temperature level of a fatal heat, and this, by thermo-transformation. This is the case with a heat pump (PAC), this one, however consuming electricity, The PAC performance is given by its COP, that is to say, its coefficient of performance. This coefficient is the ratio between the hot thermal power produced by the heat pump to the electric power consumed to power the various organs that constitute it (compressor). The technical COP of the PACs supplied by the manufacturers, in general, has a value that is between 3 and 5, meaning that, when we have consumed 100 Wh_e to power the PAC, it delivers between 300 Wh_{th} and 500 Wh_{th} at higher temperature. However, taking into account the coefficient of equivalence of electricity in primary energy, for a heat consumption of the heat pump of 100 Wh_e, we actually consume 230 Wh_{th} in primary energy, to supply between 300 and 500 Wh_{th} to the process.

On rappelle ensuite les principales lois de conservation de l'énergie en systèmes ouverts, en particulier pour les fluides en écoulement de conduite et pour le chauffage d'enceintes.

On fournit alors les consommations spécifiques (SEC) en énergies électrique ou thermique des procédés et équipements associés suivants :

- le broyage de solides,
- le transport en conduite de liquides et de dispersions solide-liquide,
- la pulvérisation de liquides incompressibles,
- la compression des gaz,
- le transport en conduite de gaz et de dispersions solide-gaz (transport pneumatique),
- l'utilisation de contacteurs/réacteurs solide-gaz (lits fluidisés),
- en agitation-mélange de liquides (newtoniens et non-newtoniens) et de dispersions solide-liquide,
- le chauffage de gaz, de liquides (newtoniens et non-newtoniens) et de dispersions solide-liquide,
- la séparation mécanique solide-liquide et gaz-solide,
- l'adsorption gaz-solide,
- la production de vapeur/électricité,
- le séchage de solides,
- l'évapoconcentration de solutions ou d'effluents liquides chargés,
- le chauffage de bâtiments industriels.

Ces données sont illustrées à l'aide de nombreux exemples numériques.

Une description des principaux types d'équipements utilisés dans les installations de traitement des déchets, ainsi que leurs principes de fonctionnement, est ensuite abordée.

En particulier, on détaille les équipements suivants :

- Tuyauteries, conduites de transport et réservoirs,
- Transformateur en fourniture d'électricité,
- Moteurs électriques,
- Pompes pour liquides,
- Ventilateurs/extracteurs aérauliques,
- Compresseur à gaz,
- Les sécheurs et évapo-concentrateurs,
- Les équipements de granulation/pelletisation,
- Les équipements de tri/extraction,
- Les équipements de déferraillage,
- Utilisations des combustibles,
- Equipements de compostage des déchets,
- Equipements de digestion anaérobie des déchets,
- Les fours d'incinération,
- Les équipements de traitement des fumées,
- Les chaudières,
- Les turbines à vapeur (TAV),
- Les aéroréfrigérants et condenseurs,
- Les aérothermes.

On fournit les données et procédures de calcul des coûts de transport (par tonne et par km) des matières premières et déchets, et ce, aussi bien pour le transport routier, que ferroviaire ou que fluvial. Le calcul du coût de revient d'un transport routier peut être calculé par la procédure mise en place par le CNR (Comité National Routier). Ce calcul s'appuie sur la procédure du trinôme, mettant en œuvre trois indices, publiés annuellement par le CNR.

Sur cette base, un exemple numérique de calcul de coûts par transport routier est détaillé. De même pour le transport ferroviaire et fluvial. Le coût spécifique moyen, à la tonne, pour le client, pour un transport par voie ferroviaire sur une distance, par exemple, de $D = 350$ km, est de : 20,4 € HT/tonne, tandis qu'il est de : 12-17 € HT/tonne, par voie fluviale, selon le gabarit.

We then recall the main laws of energy conservation in open systems, in particular for fluids in pipe flow and for space heating.

The specific consumption (SEC) in electrical or thermal energy of the following processes and associated equipment, is then provided for:

- Solid grinding,
- Pipeline transport of liquids and solid-liquid dispersions,
- Spraying incompressible liquids,
- Gas compression,
- Gas transport with solid-gas dispersions (pneumatic transport),
- Use of solid-gas contactors / reactors (fluidized beds),
- Stirring-mixing of liquids (Newtonians and non-Newtonians) and solid-liquid dispersions,
- Heating of gases, liquids (Newtonians and non-Newtonians) and solid-liquid dispersions,
- Mechanical solid-liquid and gas-solid separation,
- Gas-solid adsorption,
- Steam / electricity production,
- Solid drying,
- Evapo-concentration of solutions or charged liquid effluents,
- Heating of industrial buildings.

This data is illustrated using numerous numerical examples.

A description of the main types of equipment used in waste treatment facilities, as well as their operating principles, is then discussed.

In particular, we detail the following equipments:

- Pipes, transport lines and tanks,
- Transformer in electricity supply,
- Electric motors,
- Pumps for liquids,
- Aeraulic fans / extractors,
- Gas compressor,
- Dryers and evapo-concentrators,
- Granulation / pelletizing equipment,
- Sorting / extraction equipment,
- Steelwork equipment,
- Uses of fuels,
- Waste composting equipment,
- Anaerobic waste digestion equipment,
- Incineration kilns,
- Flue-gas treatment equipment,
- Boilers,
- Steam turbines (TAV),
- Air coolers and condensers,
- Air pre-heaters.

The data and procedures for calculating the transport costs (per tonne and per km) of raw materials and waste are provided for road, rail and river transport. The calculation of the cost price of a road transport can be calculated by the procedure set up by the CNR (National Road Committee). This calculation is based on the trinomial procedure, using three indices, published annually by the CNR.

On this basis, a numerical example of calculation by road transport is detailed, similarly in rail and river transport. The average specific cost, per tonne, for the customer, for transport by rail over a distance, for example, of $D = 350$ km, is: € 20.4 HT / tonne, while it is: € 12-17 HT / ton, by river, depending on the size.

Les taux d'émissions de CO₂ associées à ces différents types de transport sont indiqués (79 g CO₂/t.km, pour la route, 14,18 g CO₂/t. km pour le rail, 21- 35 g CO₂/t. km par voie fluviale).

On fournit ensuite les coûts d'acquisition de chacun des différents équipements mis en œuvre (PEC, *Purchase Equipment Costs*), départ usine ou livrés sur site (coûts de transport), intervenant dans l'évaluation des CAPEX.

Les procédures associées sont précisées, permettant, en particulier :

- Les corrections du PEC en fonction de la taille, de la pression et température de fonctionnement et du matériau constructif de l'équipement,
- L'actualisation des PEC (indice CEPCI),
- L'extrapolation/intrapolation d'échelle sur les PEC,
- Le couplage des procédures d'extrapolation et d'actualisation des PEC.

Les PEC des différents équipements industriels, fournis sous forme de corrélations ou de cas de référence, l'ont été pour les équipements suivants :

- les moteurs électriques,
- les pompes centrifuges,
- les ventilateurs centrifuges,
- les compresseurs centrifuges,
- les réservoirs de stockage,
- les trémies tampon pour solides,
- les convoyeurs à solides,
- les équipements de séparation de solides,
- les trommels rotatifs,
- les cribles à étoiles (ou à disques), balistique et vibrants,
- les équipements de séparation gaz-solide (cyclone, zig-zag, FAM),
- les équipements de séparation solide-liquide (filtre à tambour, filtre rotatif, filtre-presse, décanteur centrifuge),
- les broyeurs à solides,
- les compacteurs à balles,
- les équipements thermiques (échangeurs à tubes et calandre, échangeurs à plaques, évaporateurs à racleurs mobiles, évaporateur à double effets, évapoconcentrateur à CMV),
- les sécheurs (sécheur direct à bande, sécheur indirect à palettes),
- les générateurs de chaleur (générateurs d'air chaud, chaudières à eau chaude, aérothermes à eau chaude, chaudières à vapeur surchauffée, économiseurs sur chaudières),
- les générateurs d'air froid et eau glacée,
- les équipements de méthanisation en voie humide (digesteurs anaérobies, purification du biogaz, moteurs thermique, traitement de l'air par lavage, en sortie de sécheurs thermiques de digestats, traitement de stripping des condensats d'évapoconcentration de digestats, acidification des digestats)
- les équipements de méthanisation en voie sèche,
- les équipements de compostage de déchets,
- les équipements d'une unité d'incinération de déchets (cas de référence) et traitement mécanique des mâchefers,
- les équipements de traitement mécanique des mâchefers,
- les équipements d'infrastructures industrielles,
- les voiries et plateformes,
- les bâtiments,
- les utilités.

Le PEC de l'ensemble des équipements constituant des unités de référence prises en exemple, en tri des déchets, en compostage, en méthanisation, en incinération et en traitement des mâchefers, sont explicités.

The CO₂ emission rates associated with these different types of transport are indicated (79 g CO₂ / t.km, for road, 14.18 g CO₂ / t.km for rail, 21-35 g CO₂ / t. km by waterway).

We then supply the acquisition costs for each of the different equipment used (PEC, Purchase Equipment Costs), ex-works or delivered on site (transport costs), involved in the evaluation of CAPEX.

The associated procedures are specified, allowing, in particular:

- *PEC corrections depending on the size, operating pressure and temperature and the constructive material of the equipment,*
- *Updating of PECs (CEPCI index),*
- *Extrapolation / intrapolation of scale on PECs,*
- *Coupling of the extrapolation and updating of PEC procedures.*

The PECs of the various industrial equipments, supplied in the form of correlations or reference cases, are provided for the following equipment:

- *Electric motors,*
- *Centrifugal pumps,*
- *Centrifugal fans,*
- *Centrifugal compressors,*
- *Storage tanks,*
- *Buffer hoppers for solids,*
- *Solid conveyors,*
- *Solid separation equipment,*
- *Rotary trommels,*
- *Star (or disc), ballistic and vibrating screens,*
- *Gas-solid separation equipment (cyclone, zig-zag, FAM),*
- *Solid-liquid separation equipment (drum filter, rotary filter, filter press, centrifugal decanter),*
- *Solid mills,*
- *Bale compactors,*
- *Thermal equipment (tube and calender heat exchangers, plate heat exchangers, evaporators with mobile scrapers, double-effect evaporator, CMV evaporator),*
- *Dryers (direct belt dryer, indirect pallet dryer),*
- *Heat generators (hot air generators, hot water boilers, hot water air heaters, superheated steam boilers, economizers on boilers),*
- *Cold air and chilled water generators,*
- *Wet anaerobic digestion equipment (anaerobic digesters, biogas purification, heat engines, air treatment by washing, at the outlet of thermal digestate dryers, treatment for stripping condensates from evapo-concentration of digestates, acidification of digestates)*
- *Anaerobic digestion equipment,*
- *Waste composting equipment's,*
- *Equipment of a waste incineration unit (reference case) and mechanical treatment of bottom ash,*
- *Mechanical processing equipment for bottom ash,*
- *Industrial infrastructure equipment,*
- *Roads and platforms,*
- *Buildings,*
- *Utilities.*

The PEC of all the equipment constituting the reference units, taken as an example, in waste sorting, in composting, in anaerobic digestion, in incineration and in treatment of bottom ash, are explained.

We then specify the total installation costs (TOT). A linear correlation has been established (Lang), on the basis of statistical data, between the TOT, that is to say the total installed cost of an industrial unit and the sum of the PECs

On précise ensuite les coûts totaux d'installation (TOT). Une corrélation linéaire a été établie (Lang), sur la base de données statistiques, entre le TOT, c'est-à-dire le coût total installé d'une unité industrielle et la somme des PEC des équipements constituant cette installation, auxquels s'ajoute l'ensemble des frais annexes (bâtiments, électricité, voirie, études, assurances,...), indiquant que :

$$TOT = f_L \times \sum PEC_i,$$

où f_L est désigné par le **facteur de Lang**.

La procédure d'évaluation du facteur de Lang, telle que modifiée par la méthode de Hand, est également présentée. Celle-ci prend en compte, non pas un facteur global multiplicatif de l'ensemble des coûts des équipements, mais les facteurs spécifiques permettant de sommer l'ensemble des coûts des équipements installés constituant l'installation, auxquels on ajoute les coûts auxiliaires (bâtiments, électricité, instrumentation, études). Ces coûts d'installation de chacun des équipements, ainsi que les coûts annexes, sont détaillés.

On détermine, à l'aide d'études de cas, le TOT et le facteur de Lang (PEC et TOT) d'unités de référence de tri mécanique de déchets, d'unités de compostage, d'unités de méthanisation et d'unités d'incinération. Le facteur de Lang d'une unité de cogénération bois, est également fourni. Les TOT, en M€ HT/MWth, de deux chaufferies industrielles (Gennevilliers, Blue Paper à Strasbourg) sont également présentés.

Pour l'évaluation des OPEX, on précise les données nécessaires à l'évaluation des :

- Coûts de transport (routier, ferroviaire, fluvial) (Cf. plus haut),
- Coûts des matières premières et énergie, de l'électricité, eau industrielle, des agents réactifs,
- Coûts des matériaux vierges ou recyclés (métaux, plastiques),
- Coûts d'évacuation des déchets et d'enfouissement (ISDD, ISDND, ISDI)
- Coûts de maintenance (corrective ou préventive) et évaluation par la méthode de Noiret et la méthode ABC (diagramme de Pareto),
- Les frais d'assurances. Utilisation de l'indice RI de Risques industriels, établi par la FFA (Fédération Française de l'Assurance).
- Coûts de personnels (salaires moyens, cotisations sociales, travail posté),
- Les taxes (TGAP, IS, taxe d'apprentissage, dépenses de formation professionnelle continue (FCP) du personnel).

Des éléments d'ingénierie financière sont fournis, en particulier pour le remboursement des emprunts, avec un exemple de tableau de remboursement d'un emprunt, ainsi que pour évaluer les dotations aux amortissements.

Des exemples de détermination des OPEX d'installations industrielles de compostage, de méthanisation et d'incinération sont fournis.

La décomposition des coûts dans le compte de résultats est explicitée.

En conclusion, le présent Rapport a été conçu comme un outil permettant l'évaluation technico-économique préliminaire des principaux procédés de traitement de déchets, au niveau de leur Avant-projet sommaire (APS).

La procédure utilisée s'appuie sur des données de consommations spécifiques en énergie des différents équipements (SEC), sur leurs coûts d'acquisition (PEC), sur

of the equipments constituting this installation, to which are added all the additional costs (buildings, electricity, roads, studies, insurance, etc.), indicating that:

$$TOT = f_L \times \sum PEC_i,$$

where f_L is designated by the **Lang factor**.

The Lang factor evaluation procedure, as modified by the Hand method, is also presented. This takes into account, not a global multiplicative factor of all the equipment costs, but the specific factors making it possible to sum all the costs of the installed equipment constituting the installation, to which we add the auxiliary costs (buildings, electricity, instrumentation, studies). These installation costs for each piece of equipment, as well as the associated costs, are detailed.

Case studies determine the TOT and Lang factor (PEC and TOT) of reference mechanical waste sorting units, composting units, methanisation units and incineration units. The Lang factor of a wood cogeneration unit is also provided. The TOT, in M€ HT / MWth, of two industrial boilers (Gennevilliers, Blue Paper in Strasbourg) are also presented.

For the determination of OPEX, we then specify the data necessary for the evaluation of the:

- Transport costs (road, rail, river) (see above),
- Costs of raw materials and energy, electricity, industrial water, reactive agents,
- Costs of virgin or recycled materials (metals, plastics)
- Waste disposal and landfill costs (ISDD, ISDND, ISDI)
- Maintenance costs (corrective or preventive) and evaluation by the Noiret method and the ABC method (Pareto diagram),
- Insurance costs. Use of the RI index of industrial risks, established by the FFA (French Federation of Insurance).
- Staff costs (average wages, social security contributions, shift work),
- Taxes (TGAP, IS, apprenticeship tax, staff continuing professional development expenditure (CPF).

Financial engineering elements are provided, in particular for the repayment of loans, with an example of a repayment schedule for a loan, as well as to assess depreciation charges.

Examples of OPEX determination of industrial composting, methanisation and incineration plants are provided.

The breakdown of costs in the income statement is explained.

In conclusion, this Report has been designed as a tool for the preliminary technical and economic assessment of the main waste treatment processes, at the level of their preliminary Design (APS).

The procedure used is based on specific energy consumption data for the various equipment (SEC), on their acquisition costs (PEC), on their installed costs (TOT), as well as on all the data allowing the OPEX evaluation (energy, raw materials, transport, maintenance, insurance, personnel costs, taxes, etc.).

The applicability of the various OPEX and CAPEX evaluation procedures and correlations presented was illustrated in four case studies: mechanical sorting of waste, composting, methanation and incineration of waste.

leurs coûts installés (TOT), ainsi que sur l'ensemble des données permettant l'évaluation des OPEX (énergie, matières premières, transport, maintenance, assurances, frais de personnel, taxes, ...).

L'applicabilité des différentes procédures d'évaluation des OPEX et CAPEX et corrélations présentées, a été illustrée sur quatre cas d'étude : le tri mécanique des déchets, le compostage, la méthanisation et l'incinération des déchets.