

Design Approach for the Improvement of the Economic and Environmental Performances of Potable Water Supply

THÈSE N° 4159 (2008)

PRÉSENTÉE LE 11 SEPTEMBRE 2008

À LA FACULTE SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR
LABORATOIRE D'ÉNERGÉTIQUE INDUSTRIELLE
PROGRAMME DOCTORAL EN ENERGIE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

François VINCE

Ingénieur diplômé de l'Ecole Polytechnique, Palaiseau, France
et de nationalité française

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A. Rufer, président du jury
Dr F. Maréchal, Prof. M. Pontié, directeurs de thèse
Mme E. Aoustin, rapporteur
Prof. S. Hellweg, rapporteur
Prof. L. Serra, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2008

ABSTRACT

Triggered by the Kyoto Protocol and by the aggravation of freshwater scarcity, environmental impacts should soon become key decision criteria for the planning of potable water supply projects, especially when advanced systems such as seawater desalination are at stake. In order to foster the transition of the water industry towards sustainable practices, the present work proposes an integrated design approach dedicated to potable water supply that targets both economic and environmental objectives.

At first, the current industrial practices (Chapter I) and the technical characteristics of potable water supply systems (Chapter II) are analyzed via the modeling of the process units used for potable water supply: pumping systems, conventional water treatment processes (e.g. clarification, filtration, disinfection) and advanced water treatment processes (e.g. membrane processes, thermal processes).

Using the ISO 14040 standardized Life Cycle Assessment (LCA) method, Chapter III presents the development of a performance indicator that assesses the environmental impacts generated through all stages of the life cycle of potable water supply (i.e. from "cradle to grave"): from the construction of the potable water treatment plant, to its operation and decommissioning.

This LCA-based indicator provides a holistic overview of all potential environmental impacts (e.g. green house gases (GHG) emissions, impacts on ecosystems and on human health). It allows to stress out the impact sources and the penalizing steps within potable water supply (Chapter IV): The production of electricity and chemicals required by the potable water treatment plant is highlighted to generate respectively 75% and 15% of the total impacts generated during the life cycle of potable water supply.

Different potable water supply scenarios (e.g. potable water supply from ground water, from surface water, seawater desalination, water import from distant water resources) are benchmarked, in order to identify the best solutions as a function of the local context (e.g. type of electricity supply, topographic conditions, feed water quality).

Based on the results of the environmental assessment, Chapter V proposes measures for the improvement of the industrial practices of the water sector, targeting energy and chemicals management, electricity sourcing and effluent disposal.

Within the same perspective, Chapter VI details an optimization method for the design of the reverse osmosis (RO) membrane process, i.e. the key treatment process for desalination and wastewater reclamation. This method systematically synthesizes RO process configurations and evaluates their performances on economical (total annualized costs), technical (energy requirement, water conversion rate) and environmental criteria (GHG emissions). Evolutionary algorithms are then used to optimize the design of these configurations (process layout and operating conditions) and to identify those featuring the best trade-offs between economical costs and environmental impacts.

As case study, the optimization method is applied on a brackish water reverse osmosis (BWRO) desalination project. The characteristics of the optimal BWRO process configurations are calculated as a function of the project constraints (e.g. economical and technical settings, minimum potable water quality), in order to illustrate how this method may support process engineers for the design of desalination plants.

Keywords: Potable water supply, Water treatment processes, Process design, Life cycle assessment (LCA), GHG emissions, Reverse osmosis (RO), Multi-objective optimization

RESUME

Dans la lignée du protocole de Kyoto et au vue de l'aggravation des situations de manque d'eau, les aspects environnementaux deviennent de plus en plus importants lors du choix des futures filières d'approvisionnement en eau potable, en particulier pour les procédés avancés tels que le dessalement d'eau de mer. Afin d'accélérer la transition du secteur de l'eau vers des pratiques durables, ce travail développe une méthode de design dédiée aux filières d'approvisionnement en eau potable, qui intègre simultanément les dimensions économique et environnementale

En premier lieu, les pratiques industrielles (Chapitre I) et les caractéristiques techniques des filières existantes (Chapitre II) sont étudiées à travers la modélisation de chacun des procédés unitaires utilisés pour l'approvisionnement en eau potable : systèmes de pompages, procédés conventionnels de traitement d'eau (ex : clarification, filtration, désinfection), procédés avancés de traitement d'eau (ex : procédés membranaires, procédés thermiques).

Le Chapitre III présente l'indicateur développé pour l'évaluation de la performance environnementale des filières d'approvisionnement en eau potable. Cet indicateur est basé sur la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (normalisée ISO 14040), qui prend en compte l'ensemble des impacts générés lors du cycle de vie d'un procédé ou d'un produit, ici l'alimentation en eau potable, « depuis le berceau jusqu'à la tombe », c.-à-d. depuis la construction de l'usine de production d'eau potable, son opération jusqu'à son démantèlement.

L'indicateur, qui intègre l'ensemble des impacts environnementaux (ex : émissions de gaz à effet de serre, impacts sur la santé humaine, impacts sur les écosystèmes), permet de mettre en exergue les sources d'impacts et les procédés à améliorer au sein des filières d'alimentation en eau potable (Chapitre IV). A ce titre, la production de l'électricité et des produits chimiques nécessaires à l'usine de production d'eau potable est identifiée comme générant respectivement 75% et 15% de l'ensemble des impacts du cycle de vie de l'alimentation en eau potable

Différents scénarios d'approvisionnement (ex : alimentation à partir d'eau souterraine, de rivière, dessalement, importation d'eau) sont ensuite comparés, afin de déterminer quelles sont les meilleures solutions selon le contexte local du projet (ex : contraintes topographiques, qualité de l'eau brute, alimentation électrique de la zone ciblée).

A partir de ces résultats, le Chapitre V propose un plan d'action afin d'améliorer la performance environnementale des industriels de l'eau. Ces mesures d'améliorations ciblent l'efficacité énergétique des procédés, la contractualisation d'une alimentation électrique de haute qualité pour l'usine de production d'eau potable, la gestion des produits chimiques ainsi que le traitement des effluents de l'usine.

Toujours dans la même optique, le Chapitre VI propose une méthode d'optimisation pour le design du procédé membranaire d'osmose inverse (OI), i.e. le procédé clé pour le dessalement et la réutilisation des eaux usées. Cette méthode conçoit de manière systématique des configurations de procédé OI, dont elle évalue les performances sur des critères économiques (coût totaux annualisés), techniques (consommation électrique, taux de conversion d'eau) et environnementaux (émissions de gaz à effet de serre). La méthode s'appuie ensuite sur des algorithmes génétiques qui optimisent le design de ces configurations en fonction des contraintes du projet et identifient celles qui présentent le meilleur compromis entre coûts et impacts environnementaux.

Cette méthode d'optimisation est appliquée à un projet de dessalement d'eau saumâtre comme cas d'étude. Les caractéristiques optimales du procédé de dessalement sont calculées en fonction des contraintes du projet, afin d'illustrer comment la méthode développée peut aider les ingénieurs chargés du design des usines de dessalement

Mots clés : Alimentation en eau potable, Procédé de traitement d'eau, Conception de filières, Analyse de Cycle de Vie (ACV), Gaz à effet de serre (GES), Osmose Inverse (OI), Optimisation multi-objectif.

SUMMARY

GLOSSARY	13
INTRODUCTION	15
CHAPTER I - CHALLENGES FOR FUTURE POTABLE WATER SUPPLY	17
1. CURRENT INDUSTRIAL PRACTICES	18
1.1. POTABLE WATER SUPPLY AND OTHER HUMAN WATER USAGES	18
1.1.1. <i>Water resources availability</i>	18
1.1.2. <i>Human water withdrawals</i>	20
1.2. DESIGN AND PERFORMANCES OF POTABLE WATER SUPPLY SYSTEMS	21
1.2.1. <i>Conventional potable water supply from freshwater resources</i>	22
1.2.2. <i>Potable water supply from polluted or distant freshwater resources</i>	22
1.2.3. <i>Potable water supply from alternative resources</i>	23
1.3. DRIVERS FOR THE WATER INDUSTRY	24
1.3.1. <i>Increasing human water withdrawals</i>	24
1.3.2. <i>Water stress situations</i>	26
1.3.3. <i>Environmental governance</i>	27
2. TARGETED DESIGN APPROACH	28
2.1. PROBLEM STATEMENT	28
2.2. RESEARCH METHODOLOGY	30
2.2.1. <i>Technical modeling of potable water supply systems</i>	30
2.2.2. <i>Environmental performance indicator</i>	30
2.2.3. <i>Systematic process design under environmental and economic objectives</i>	31
CHAPTER II - MODELING OF POTABLE WATER SUPPLY SYSTEMS	33
1. PROCESS UNIT MODELING APPROACH	34
1.1. BOTTOM-UP MODELING	34
1.1.1. <i>Water quality parameters</i>	35
1.1.2. <i>Generic process unit model</i>	36
1.2. STATISTICAL CALIBRATION	38
2. RAW WATER INTAKE, POTABLE WATER DISTRIBUTION	39
3. INSTRUMENTATION, HEATING AND AUXILIARIES	40
4. CONVENTIONAL TREATMENT PROCESSES	40
4.1. CLARIFICATION	40
4.1.1. <i>Coagulation and flocculation</i>	40
4.1.2. <i>Settling</i>	42
4.2. FILTRATION	45
4.3. CHEMICAL DISINFECTION	48
4.3.1. <i>Ozonation</i>	48
4.3.2. <i>Chlorination</i>	50
4.3.3. <i>UV radiation</i>	50
4.3.4. <i>Powdered activated carbon injection</i>	51
4.4. SLUDGE TREATMENT	52
4.5. PH, HARDNESS AND ALKALINITY CONTROL	54

5.	ADVANCED TREATMENT PROCESSES	55
5.1.	DENITRATATION, DECARBONATATION, DEMANGANISATION, DEIONIZATION	55
5.1.1.	<i>Ion exchange resins</i>	55
5.1.2.	<i>Electrodialysis</i>	55
5.2.	MEMBRANE PROCESSES	56
5.2.1.	<i>Dead-end filtration membrane processes</i>	57
5.2.2.	<i>Cross-flow filtration membrane processes</i>	60
5.3.	THERMAL DESALINATION PROCESSES	74
5.3.1.	<i>Multi-stage flash</i>	74
5.3.2.	<i>Multi-effect evaporation (MEE)</i>	75
6.	CONCLUSIONS	77

CHAPTER III - ENVIRONMENTAL PERFORMANCE INDICATOR 79

1.	STATE OF THE ART	80
1.1.	LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)	80
1.1.1.	<i>General definition of environmental impacts</i>	80
1.1.2.	<i>LCA approach and method</i>	80
1.2.	LITERATURE REVIEW	82
1.2.1.	<i>LCA studies on water treatment processes</i>	82
1.2.2.	<i>LCA studies on potable water supply systems</i>	82
1.2.3.	<i>LCA studies on urban water systems including wastewater treatment</i>	83
1.3.	IMPROVING THE SCOPE OF THE LCA	84
1.3.1.	<i>Impact assessment of effluent discharges from water treatment</i>	84
1.3.2.	<i>Impact assessment of freshwater resources depletion</i>	84
2.	LCA PROCEDURE	85
2.1.	GOAL AND SCOPE DEFINITION	85
2.2.	LIFE CYCLE INVENTORY (LCI)	86
2.2.1.	<i>Foreground processes</i>	86
2.2.2.	<i>Background processes</i>	88
2.3.	LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT (LCIA)	90
2.3.1.	<i>IMPACT 2002+ LCIA method</i>	90
2.3.2.	<i>Complementary performance indicators</i>	93
2.4.	UNCERTAINTY ANALYSIS	94
2.4.1.	<i>Parameter uncertainty indicators</i>	94
2.4.2.	<i>Parameter variation and Monte-Carlo analysis</i>	95
3.	CHARACTERIZATION OF EFFLUENT DISCHARGES	96
3.1.	EFFLUENT SELECTION	96
3.2.	CALCULATION OF THE IMPACT CHARACTERIZATION FACTORS	98
3.2.1.	<i>Aquatic acidification</i>	98
3.2.2.	<i>Aquatic eutrophication</i>	98
3.2.3.	<i>Aquatic ecotoxicity</i>	99
4.	ACCOUNTING OF FRESHWATER RESOURCES DEPLETION WITHIN THE LCA	104
4.1.	EXTENSION OF THE LCI FRAMEWORK	104
4.2.	DEFINITION OF IMPACT PATHWAYS RELATED TO WATER USE	104
5.	CONCLUSIONS	105

CHAPTER IV - ENVIRONMENTAL IMPACTS OF POTABLE WATER SUPPLY 107

1.	IMPACT SOURCES WITHIN THE LIFE-CYCLE OF POTABLE WATER SUPPLY	108
1.1.	MIDPOINT IMPACT ASSESSMENT	108
1.1.1.	<i>Construction phase</i>	109
1.1.2.	<i>Operation phase</i>	109
1.2.	ENDPOINT DAMAGE ASSESSMENT	111
1.2.1.	<i>Climate change</i>	111
1.2.2.	<i>Resources depletion</i>	112
1.2.3.	<i>Damage to human health</i>	112
1.2.4.	<i>Damage to ecosystems</i>	113
1.3.	NORMALIZED ENVIRONMENTAL SCORE	115
2.	BENCHMARK OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCES	116
2.1.	CASE STUDY	116
2.2.	LIFE CYCLE ELECTRICITY CONSUMPTION	118
2.3.	GHG FOOTPRINT	120
2.4.	LIFE-CYCLE WATER WITHDRAWALS	122
2.5.	BREAK-EVEN DISTANCE	122
3.	SENSITIVITY ANALYSIS	124
3.1.	LCA RESULTS COMPARISON USING IMPACT 2002+ AND OTHER LCIA METHODS	124
3.1.1.	<i>Midpoint impact assessment using EDIP 2003</i>	124
3.1.2.	<i>Endpoint damage assessment using Eco Indicator 99</i>	125
3.2.	FEEDBACK ON THE IMPACT ASSESSMENT METHOD DEVELOPED FOR LIQUID DISCHARGES	127
3.2.1.	<i>Aquatic eutrophication</i>	127
3.2.2.	<i>Aquatic ecotoxicity</i>	127
3.3.	INFLUENCE OF ELECTRICITY SUPPLY ON IMPACT ASSESSMENT	131
3.3.1.	<i>Potable water supply from ground water using UCTE or French electricity supply</i>	131
3.3.2.	<i>Desalination using either the UCTE electricity grid mix or wind turbines</i>	133
3.3.3.	<i>Proposals for country-specific LCI</i>	134
4.	CONCLUSIONS	135

CHAPTER V - IMPROVEMENT MEASURES FOR IMPACT MITIGATION 137

1.	ENERGY MANAGEMENT AND EFFICIENCY	138
1.1.	ELECTRICITY CONSUMPTION FOR WATER INTAKE, DISTRIBUTION AND IMPORT	138
1.2.	ELECTRICITY CONSUMPTION FOR CONVENTIONAL TREATMENT PROCESSES	140
1.3.	HEAT AND ELECTRICITY CONSUMPTION FOR ADVANCED TREATMENT PROCESSES	141
1.3.1.	<i>NF/RO membrane processes</i>	141
1.3.2.	<i>Thermal desalination processes</i>	147
1.3.3.	<i>Other desalination technologies</i>	151
1.3.4.	<i>Hybrid desalination and integration with other processes</i>	152
1.4.	HEAT AND ELECTRICITY CONSUMPTION FOR AUXILIARIES	154

2.	ENERGY SOURCING	155
2.1.	CONTRACTING OF GREEN ELECTRICITY	155
2.2.	INTEGRATED POWER AND WATER PLANTS	156
2.3.	POTABLE WATER SUPPLY AS ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS	157
3.	CHEMICALS MANAGEMENT	157
3.1.	MINIMIZING THE CHEMICALS DOSES	157
3.2.	ENVIRONMENTAL-FRIENDLY CHEMICALS SELECTION	158
3.2.1.	<i>Example of coagulant selection</i>	158
3.2.2.	<i>Environmental information from chemical suppliers</i>	158
4.	LIQUID DISCHARGES MANAGEMENT	159
4.1.	MEASUREMENT AND BIOMONITORING OF LIQUID DISCHARGES	159
4.2.	TREATMENT AND DISPOSAL OF LIQUID DISCHARGES	160
5.	WASTE MATERIALS RECYCLING	160
6.	CONCLUSIONS	161

CHAPTER VI - OPTIMIZATION OF REVERSE OSMOSIS PROCESS DESIGN 163

1.	CONCEPTUAL RO PROCESS DESIGN	164
1.1.	MATHEMATICAL FORMULATION OF THE OPTIMIZATION PROBLEM	164
1.2.	LITERATURE REVIEW	165
1.3.	ALGORITHMIC RESOLUTION	165
1.3.1.	<i>Resolution of the MILP problem</i>	166
1.3.2.	<i>Resolution of the NLP problem</i>	167
2.	RO PROCESS OPTIMIZATION METHOD	168
2.1.	SUPERSTRUCTURE OF RO PROCESS CONFIGURATIONS	170
2.1.1.	<i>General superstructure principle</i>	170
2.1.2.	<i>Implementation of process units within the superstructure</i>	171
2.1.3.	<i>Design constraints</i>	174
2.1.4.	<i>Technical performances estimation</i>	176
2.1.5.	<i>Linear objective function for the superstructure MILP resolution</i>	178
2.2.	PERFORMANCES INDICATORS	180
2.2.1.	<i>Environmental performances</i>	180
2.2.2.	<i>Economic performances</i>	180
3.	APPLICATION TO A CASE STUDY	184
3.1.	PROCESS LAY-OUT OF OPTIMAL SOLUTIONS	185
3.2.	OPTIMAL WATER CONVERSION RATE	187
3.3.	MEMBRANE PERMEATE FLUX	189
3.4.	DESIGN SENSITIVITY TO TECHNICAL AND ECONOMIC CHANGES	190
3.4.1.	<i>Influence of membrane and electricity prices</i>	190
3.4.2.	<i>Influence of membrane lifetime</i>	191
4.	CONCLUSIONS	192

CONCLUSIONS	195
NOMENCLATURE	197
FIGURE LISTS	201
TABLE LISTS	203
BIBLIOGRAPHIC REFERENCES	205
PUBLICATIONS	220
APPENDIXES	221
APPENDIX I. AVERAGE ELECTRICITY CONSUMPTION PER PROCESS UNIT	222
APPENDIX II. MEMBRANE WATER PERMEABILITY	223
APPENDIX III. MEMBRANE DATABASE	224
APPENDIX IV. IMPACT CATEGORIES DEFINED BY IMPACT 2002+	225
APPENDIX V. ECOINVENT DATASETS USED DURING THE LCI	226
APPENDIX VI. LCA OF POTABLE WATER SUPPLY FROM GROUNDWATER	227
APPENDIX VII. LCA OF POTABLE WATER SUPPLY FROM SURFACE WATER	234
APPENDIX VIII. LCA OF POTABLE WATER SUPPLY FROM SEAWATER	240