ÉTUDE

Conception, réalisation et évaluation d'un quartier à très basse énergie

Modèle de la ville d'Egedal au Danemark

Catherine Charlot-Valdieu
Philippe Outrequin

EDITIONS LE MONITEUR
editionsdumoniteur.com

Sommaire

Résumé 7

Préambule 11

PARTIE 1 **Contexte et objectifs du projet d'écoquartier Stenloese Sud** 13

CHAPITRE 1 Partage d'une culture commune et définition des objectifs d'efficacité énergétique 15

CHAPITRE 2 Projet d'écoquartier et projet européen Class 1 27

CHAPITRE 3 Partenariat avec des industriels locaux 41

CHAPITRE 4 Règlements d'urbanisme, cahiers des charges et de prescriptions 51

CHAPITRE 5 Labels et certifications 63

CHAPITRE 6 Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) 71

PARTIE 2 **Construction neuve** 77

CHAPITRE 7 Guide de conception de bâtiments à très faible consommation d'énergie 79

CHAPITRE 8 Optimisation énergétique et analyse économique 83

CHAPITRE 9 Construction d'une école à très faible consommation d'énergie 95

CHAPITRE 10 Construction d'un centre d'activités pour personnes âgées 101

CHAPITRE 11 **Huit bâtiments quasi passifs de 65 logements sociaux** 107

CHAPITRE 12 **Construction de 42 maisons individuelles à très basse consommation d'énergie** 127

CHAPITRE 13 **Enquêtes de satisfaction et analyse socioéconomique** 163

CHAPITRE 14 **Enseignements du projet d'écoquartier et du projet Class 1 et recommandations** 177

PARTIE 3 **Production locale d'énergie** 187

CHAPITRE 15 **Production d'énergies renouvelables** 189

PARTIE 4 **Réhabilitation énergétique** 197

CHAPITRE 16 **Réhabilitation exemplaire de 7 bâtiments publics** 199

CHAPITRE 17 **Optimisation des programmes de réhabilitation et stratégie territoriale vers la transition énergétique** 217

Conclusion 231

ANNEXE A1 **Programme européen Concerto** 235

ANNEXE A2 **Partenariat du projet Class 1** 239

Glossaire 243

Index 247

Table des matières 249

CHAPITRE 11

Huit bâtiments quasi passifs de 65 logements sociaux

En 2008-2009, 65 logements passifs répartis dans huit bâtiments ont été construits par KAB, principal bailleur social danois (fig. 11.1, photos 11.1 à 11.3). Les premiers locataires ont emménagé dès 2008.

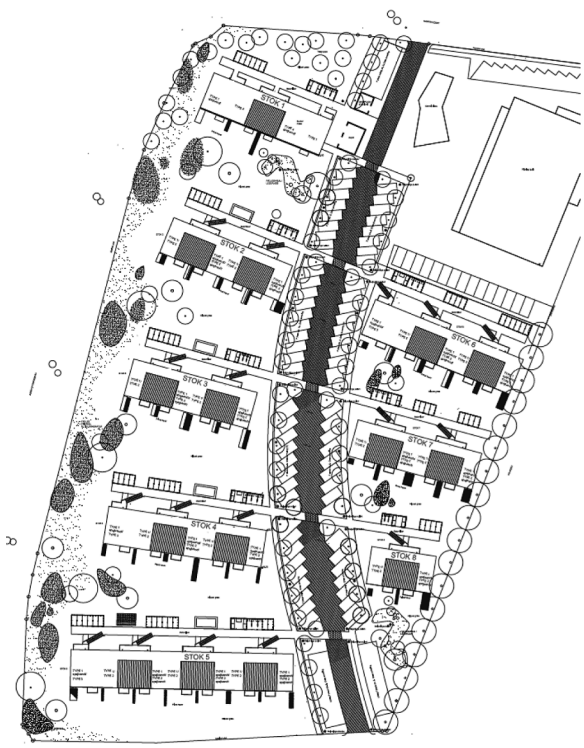

Fig. 11.1. Plan masse des 8 bâtiments collectifs comprenant 65 logements sociaux de KAB dans le quartier Stenloese Sud (source : commune d'Egedal)

Photo 11.1. Façade sud d'un bâtiment de logements sociaux à très faible consommation d'énergie à Stenloese Sud (source : projet Class 1)

Photo 11.2. Façade nord d'un bâtiment résidentiel à très faible consommation d'énergie à Stenloese Sud (source : projet Class 1)

La superficie des logements est de 82, 84, 110 ou 115 m^2, soit une moyenne de 95 m^2. Ils sont plus grands que la moyenne nationale (77 m^2) ; 4 % d'entre eux dépassent 110 m^2, seuil maximum fixé au milieu des années 1980.

Le coût de ces logements demeure proche de ceux pratiqués habituellement dans le logement social, à savoir 10 000 DKK/m^2.

11.1 Système constructif

Le choix du système constructif par le bailleur social KAB s'est porté sur un système modulaire dont le montage est très rapide (photo 11.3) : des éléments préfabriqués en bois de la taille des pièces sont assemblés sur le chantier, avec des façades rapportées en Eternit. Les finitions sont effectuées ensuite à l'extérieur comme à l'intérieur.

Les bâtiments préfabriqués s'élèvent sur deux ou trois niveaux et totalisent une surface de plancher de 6 180 m^2. L'étage est accessible par un escalier extérieur. Les logements sont conçus sur la base d'un module par pièce principale (fig. 11.2). Chaque bâtiment comporte 20 modules.

Photo 11.3. Assemblage sur site des éléments préfabriqués (source : projet Class 1)

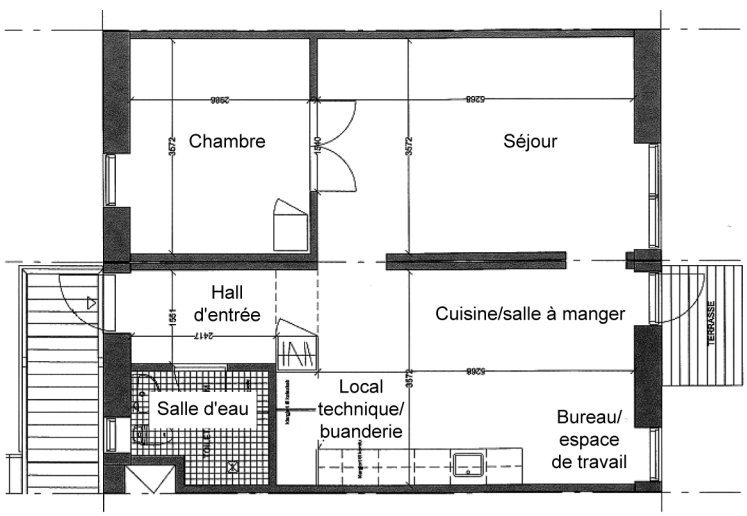

Fig. 11.2. Plan des appartements du premier étage : module de 82 m^2 (source : projet Class 1)

11.2 Enveloppe – Coefficient *U*

Les appartements ont été conçus et construits en vue d'une consommation annuelle de chauffage de 15 kWh/m^2, performance qui exige des logements très bien isolés (tab. 11.1).

Tab. 11.1. Coefficient de déperdition thermique *U* des différents éléments de l'enveloppe des bâtiments

Éléments d'enveloppe	***U-value*** (W/m^2.K)	**Épaisseur d'isolant** (mm)
Toiture	0,08	450
Murs	0,12	400
Planchers	0,10	400
Menuiseries extérieures	0,9	Triple vitrage

11.3 Chauffage, ventilation, ECS

Tous les logements devaient être raccordés au réseau de chaleur. Cependant, celui-ci n'étant pas encore construit, une chaudière à gaz a été installée en attendant le raccordement.

Les appartements sont équipés d'un système de ventilation mécanique (VMC) avec récupération de chaleur et d'un gestionnaire d'énergie. Seul le séjour est équipé d'un radiateur ; toutes les autres pièces sont chauffées par la ventilation mécanique (VMC), ce qui permet également de réduire les coûts.

Enfin, des équipements permettent de réduire la consommation d'eau (douches et chasse d'eau).

11.4 Suivi et analyse des consommations d'énergie

11.4.1 Mode de suivi, période et fiabilité

Les consommations d'énergie ont été suivies de 2008 à juillet 2011 dans 58 logements, soit sur plus de trois ans pour 80 % des logements, à l'aide du système BEMS (*Building Energy Management System*) fourni par la société EHK Home Automation(9) (ou par Seluxit pour certains logements). EHK a développé ensuite, dans le cadre du projet Class 1, l'interface permettant le contrôle de tout le système énergétique par les locataires eux-mêmes.

(9) EHK : *Electronic House Keeper*.

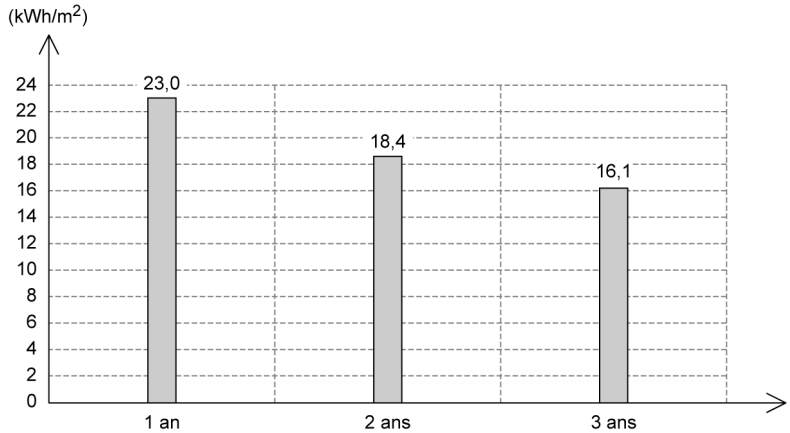

Fig. 12.6. Évolution des consommations d'énergie annuelles pour le chauffage les trois années suivant la construction de la maison K2 (source : projet Class 1)

12.2.2 Maison passive Kaerdalen 17

Cette maison est la seule maison passive de ce quartier.

Construite sur une parcelle de 711 m^2 en janvier 2008 par la « Passivehus design » Construction Company, elle comporte deux niveaux : un rez-de-chaussée de 96 m^2 et un premier étage de 60 m^2. Elle comprend 5 pièces, deux salles d'eau ou de bain, une cuisine et une terrasse de 21,4 m^2 (photo 12.3, fig. 12.7 et 12.8).

Photo 12.3. Maison passive Kaerdalen 17 (source : projet Class 1)

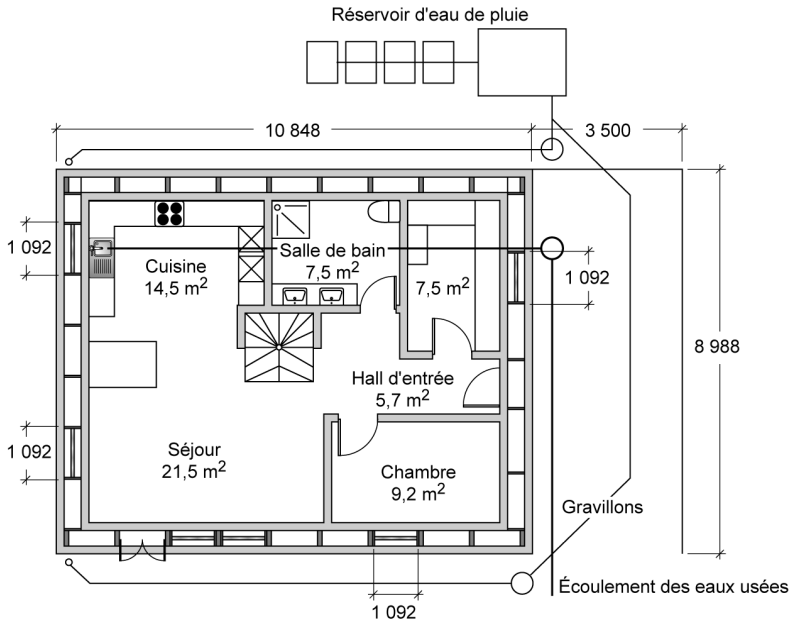

Fig. 12.7. Plan du rez-de-chaussée (source : commune d'Egedal)

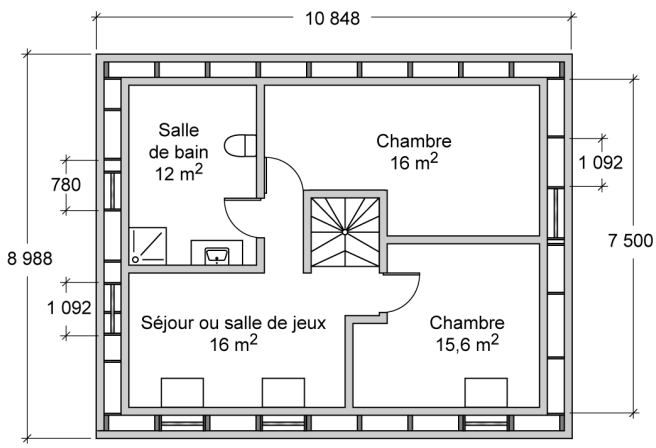

Fig. 12.8. Plan du premier étage (source : commune d'Egedal)

12.2.2.1 Enveloppe – Coefficient *U*

Les doubles murs extérieurs sont composés d'un mur en brique doublé de 1,5 cm de laine minérale et d'un mur extérieur en parpaings.

Le toit à double pente est recouvert de tuiles vernissées noires et sa pente est de 45°. 5 m^2 de panneaux solaires et 50 m^2 de panneaux photovoltaïques, d'une puissance maximale produite de 6 kWc, sont intégrés dans la toiture (fig. 12.9).

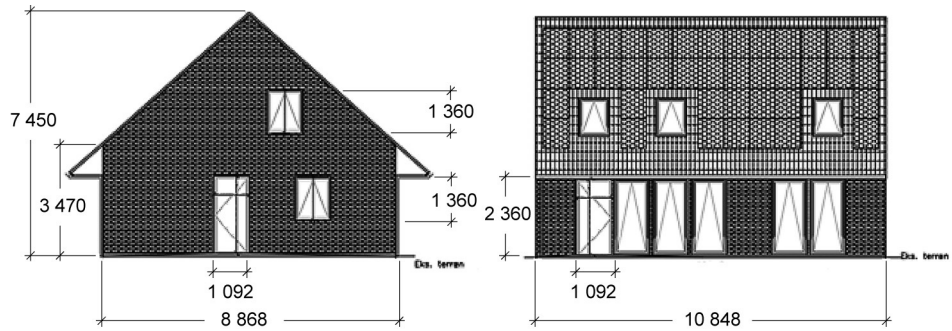

Fig. 12.9. Coupes transversales (source : commune d'Egedal)

Les grandes fenêtres en bois sont équipées de stores de protection solaire au rez-de-chaussée et au premier étage. La surface de vitrage au premier étage est de 12,7 m^2, soit 13,2 % de la surface au sol (96,2 m^2), le minimum selon la RT danoise (BR10) étant de 10 %. Les fenêtres de toit ont un coefficient de déperdition thermique de 0,8 $W/m^2.K$ (0,52 $W/m^2.K$ pour la partie vitrage) et possèdent une occultation pour le confort d'été.

Les coefficients de transmission surfacique des éléments de l'enveloppe figurent dans le tableau 12.2.

Tab. 12.2. Coefficient de transmission surfacique *U* des éléments de l'enveloppe de la maison passive Kaerdalen 17 (source : projet Class 1)

Éléments d'enveloppe	**Coefficient *U*** ($W/m^2.K$)	**Épaisseur d'isolant** (cm)
Plancher bas (5,5 cm)	0,09	35
Murs (3,7 cm)	0,19	15
Toiture (4,56 cm)	0,10	33,5
Fenêtres	0,87	Triple vitrage

12.2.2.2 Chauffage – VMC

La PAC géothermale air-eau Genvex (fig. 12.10 et 12.11) permet à la fois le chauffage, la ventilation double flux avec récupération de chaleur et l'ECS. Elle assure la récupération de la chaleur de l'air extrait de la cuisine, de la salle de bains et des différentes pièces ainsi que le renouvellement de l'air à 30 °C à hauteur de 1,2 $l/s.m^2$ en hiver et de 0,09 $l/s.m^2$ en été. Elle est raccordée à 5 m^2 de panneaux solaires. Enfin, les canalisations de géothermie sont installées à un mètre de profondeur pour éviter tout risque de gel.

CHAPITRE 15

Production d'énergies renouvelables

15.1 Panneaux photovoltaïques sur 9 bâtiments publics

La municipalité d'Egedal a décidé d'investir dans 10 000 m^2 de panneaux photovoltaïques, ce qui correspond à environ 20 % de la consommation d'électricité des bâtiments publics. Une première étude a permis d'identifier neuf bâtiments publics aux toitures susceptibles d'être recouvertes de panneaux photovoltaïques.

En septembre 2013, la société danoise Drivhus-effekten a posé neuf systèmes de panneaux photovoltaïques sur neuf bâtiments publics (photos 15.1 à 15.9), soit un total de 6 000 m^2 représentant une puissance de 916,3 kWc[(1)] avec une production annuelle garantie d'électricité de 885,113 kWh. Ces panneaux doivent couvrir 12 % des besoins d'électricité de la commune.

L'investissement est de 1,8 million d'euros (tab. 15.1) et le coût total avec la pose s'élève à 2 578 303 euros.

Tab. 15.1. Total des investissements d'Egedal dans les panneaux photovoltaïques

Capacité de production (kWc)	**Investissements**	
	DKK	***Euros***
916	13 831 600	1 854 500

Une analyse a montré que le temps de retour brut des investissements est de 25 ans[(2)].

(1) Dont 514 kWc avec l'aide financière de la Commission européenne (*via* le projet Class 1).

(2) Cette analyse dépourvue d'actualisation (comme si un euro aujourd'hui a la même valeur qu'un euro dans 25 ans) ne tient donc pas compte des coûts de maintenance et de remplacement, sachant que la durée de vie des panneaux photovoltaïques est d'une vingtaine d'années.

Deux types de panneaux ont été posés sur les toits : des panneaux noirs non réfléchissants et des panneaux bleus.

Photo 15.1. École Balsmose : 706 m², 105 kWc, 103 MWh (source : commune d'Egedal)

Photo 15.2. École Stengårds : 1 168 m², 220 kWc, 219 MWh (source : commune d'Egedal)

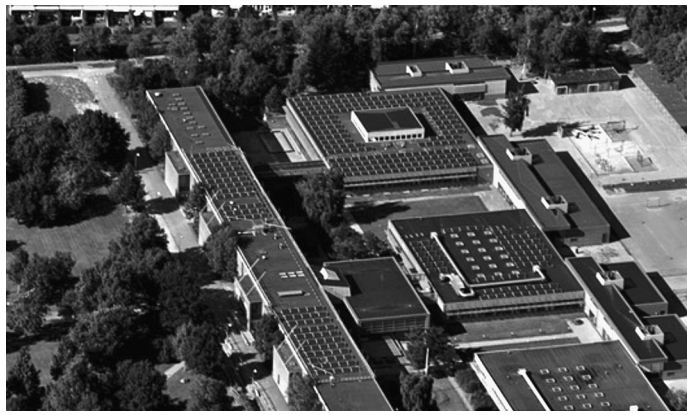

Photo 15.3. École Boesager : 643,4 m², 96 kWc, 98 MWh (source : commune d'Egedal)

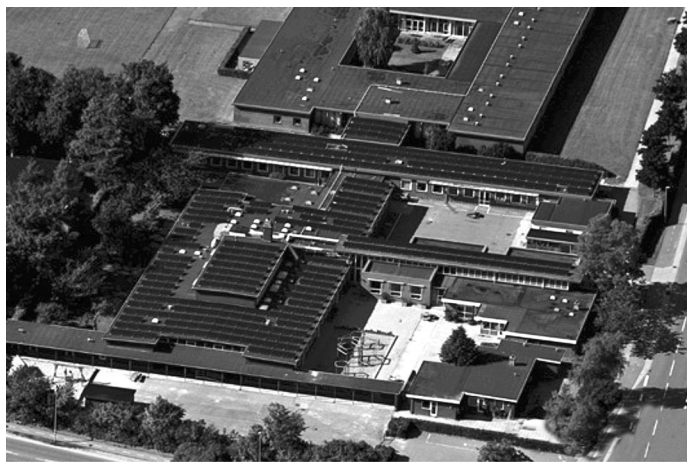

Photo 15.4. École Søager : 686 m², 105 kWc, 99 MWh (source : commune d'Egedal)

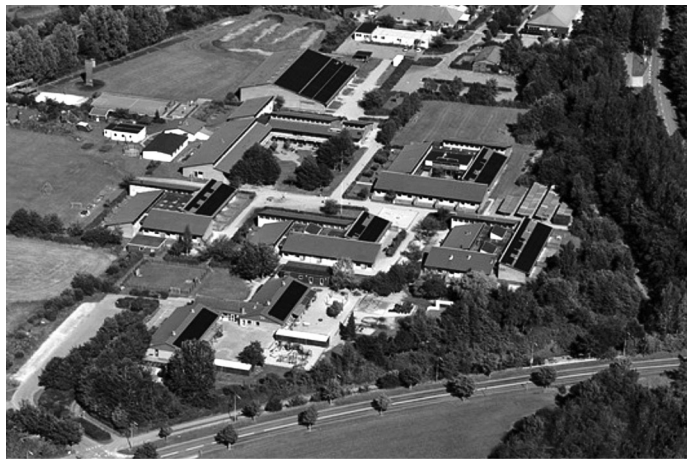

Photo 15.5. École Hampeland : 1 703 m², 258 kWc, 244 MWh (source : commune d'Egedal)

Photo 15.6. Smørum Idrætscenter : 527 m², 81 kWc, 76 MWh (source : commune d'Egedal)

Photo 15.7. Børnehuset Paletten : 191 m², 30 kWc, 28 MWh (source : commune d'Egedal)

Photo 15.8. SFO Maglehøj : 196 m², 30 kWc, 28 MWH (source : commune d'Egedal)

Photo 15.9. SFO Hampeland : 245 m², 38 kWc, 35 MWh (source : commune d'Egedal)

La production estimée et la production de la première année pour les différents bâtiments publics d'Egedal font l'objet du tableau 15.2. Ce tableau souligne une bonne productivité des panneaux (150 W/m²) et des résultats conformes aux prévisions.

Tab. 15.2. Production estimée et production de la première année (source : projet Class 1)

Bâtiments publics	**Surface des panneaux posés** (m^2)	**Puissance** (kWc)	**Production la première année** (kWh)
École Balsmose, bât. B et C	706	105	103 747
École Stengårds	1 168	220	219 000
École Boesagers, bât. A, B et D	643	96	98 006
École Søages	686	105	99 128
Ledoje-Smørum idraetscenter, Hall 2	527	81	76 259
Børnehuset Paletten	191	30	27 969
SFO Maglehøj	196	30	27 809
SFO Hampeland	245	38	35 266
École Hampelands bât. A1, B2, C6, DF8	1 703	258	243 554
Total	6 065	963	930 738

CHAPITRE 16

Réhabilitation exemplaire de 7 bâtiments publics

Egedal n'a pas élaboré une stratégie de réhabilitation énergétique mais réhabilité de façon exemplaire quelques bâtiments publics. On peut regretter que la ville d'Egedal n'ait pas cherché à élaborer une stratégie de réhabilitation énergétique de l'ensemble de son parc de bâtiments en optimisant les programmes de réhabilitation. En effet, il est bien évident aujourd'hui que, pour atteindre les objectifs de l'Union européenne comme ceux définis par un grand nombre de pays dont le Danemark ou la France, l'exemplarité ne suffit pas : il faut élaborer de véritables stratégies de réhabilitation énergétique patrimoniale (bâtiments publics, parcs des bailleurs sociaux…) et territoriale (région, département, établissement public de coopération intercommunale), ce qui constitue l'enjeu majeur des plans climat-énergie territoriaux (PCET) de deuxième génération. C'est pourquoi nous concluons cette étude en évoquant l'élaboration de telles stratégies.

Cependant, il faut rappeler que le projet Class 1 portait initialement uniquement sur la construction neuve et que c'est la crise économique qui a contraint la ville d'Egedal à étaler dans le temps la mise en œuvre de son projet d'aménagement et donc à proposer d'autres opérations à la Commission européenne en contrepartie des constructions qui ne pouvaient être menées dans le délai imparti (six ans) dans le contexte économique du moment.

16.1 Choix des bâtiments et de l'équipe de maîtrise d'œuvre

Une fois la décision prise de réhabiliter quelques bâtiments publics et cette solution acceptée par les responsables du programme Concerto (voir annexe 1A), un audit des bâtiments publics a été effectué afin d'identifier les bâtiments à réhabiliter de manière exemplaire à un coût acceptable pour la commune.

La ville d'Egedal a lancé un appel à propositions sur la réhabilitation énergétique de 110 000 m^2 de bâtiments publics, dont les bâtiments concernés par le projet Class 1, pour

un montant d'environ 50 millions de couronnes danoises. Il comportait en particulier des exigences de performances énergétiques (y compris leur suivi pour le chauffage, la ventilation, l'air conditionné, l'ECS, l'éclairage et le contrôle lui-même), des exigences de qualité de l'air intérieur, de sécurité, de choix de matériaux (à faible impact environnemental, interdiction du PVC et de bois aggloméré) et de produits (privilégiant ceux qui ont un écolabel européen ou le label nordique du Cygne blanc[1]), etc. Enfin, le temps de retour des investissements pour les performances énergétiques devait être inférieur à vingt ans, ce qui est inhabituel au Danemark, le temps de retour exigé par les municipalités étant à plus court terme habituellement.

Le choix s'est porté plus particulièrement sur les établissements scolaires car, au Danemark, l'énergie fait partie du budget d'une école et, plus il y a de charges énergétiques, moins il reste de budget pour l'éducation des enfants. Sept bâtiments ont été retenus pour être réhabilités de façon exemplaire au regard des consommations d'énergie : deux écoles primaires, Bækkegårds et Stengårds, respectivement d'environ 8 500 et 9 000 m^2, et cinq écoles maternelles ou centres pour jeunes enfants de 500 à 1 000 m^2. Ces bâtiments totalisent 20 443 m^2.

L'entreprise retenue suite à l'appel d'offres a effectué une optimisation énergétique des bâtiments afin d'identifier les travaux nécessaires pour chacun d'eux, puis elle a effectué les travaux en deux temps avec différents sous-traitants. Tout d'abord un architecte a conçu et fait réaliser la nouvelle façade de l'école Stengårds puis les travaux des sept bâtiments ont été effectués dans un seul marché.

Ces travaux ont été effectués en 2013 pour un coût total de 25 millions de DKK (soit 3,35 millions d'euros).

16.2 Réhabilitation de l'école primaire Stengårds

Ce projet est le plus important des sept. L'école Stengårds est composée de deux bâtiments construits entre 1970 et 1978. Les murs extérieurs sont des panneaux sandwich en béton avec 75 mm d'isolation. Tous ces panneaux de façade ont été recouverts d'une nouvelle peau extérieure conçue par un architecte – l'isolation par l'extérieur ayant été retenue pour ce bâtiment afin de modifier radicalement l'aspect extérieur de l'école (photos 16.1 et 16.2).

(1) En s'appuyant sur les analyses en coût global des produits labellisés par rapport aux produits non labellisés de l'Oko-Institute et de l'ICLEI (*Costs and Benefits of Green Public Requirements in Europe*) montrant qu'une économie de 7 % est possible pour les peintures.

Photo 16.1. École Stengårds avant travaux (source : projet Class 1)

Photo 16.2. École Stengårds après les travaux de réhabilitation (source : projet Class 1)

16.2.1 Travaux et économies d'énergie

Les éléments majeurs de cette réhabilitation peuvent se résumer ainsi :
– réfection de l'enveloppe : nouveaux panneaux de façade avec 25 cm d'isolant et nouvelles menuiseries extérieures pour un coût total de 12,5 millions de DKK (fenêtres comprises) ;
– renforcement de l'isolation de la toiture ;
– isolation thermique du ballon d'eau chaude et calorifugeage des canalisations ;
– calorifugeage des canalisations du système de chauffage et isolation thermique des auxiliaires de chauffage ;
– pose de VMC double flux avec récupérateur de chaleur et contrôle des émissions de CO_2 ;
– remplacement des moteurs de ventilation ;
– nouveaux équipements pour l'éclairage avec détecteur de présence, optimisation de l'intensité lumineuse au rez-de-chaussée et système centralisé de contrôle ;

Table des matières

Sommaire 5

Résumé 7

Préambule 11

PARTIE 1 **Contexte et objectifs du projet d'écoquartier Stenloese Sud** 13

CHAPITRE 1 Partage d'une culture commune et définition des objectifs d'efficacité énergétique 15

1.1 **Bâtiments à très faible consommation d'énergie** 17

1.1.1 **Bâtiment passif** 17

1.1.2 **Bâtiment à consommation d'énergie proche de zéro ou « *Nearly Zero-Energy Building* » (NZEB)** 18

1.1.3 **Bâtiment à basse énergie** 21

1.1.4 **Bâtiment ne consommant pas d'énergie (à zéro énergie)** 21

1.1.5 **Bâtiment autonome** 21

1.1.6 **Bâtiment à énergie positive (BEPOS)** 21

1.1.7 **« *Bolig + huse* »** 22

1.2 **Réglementation thermique danoise** 22

1.2.1 **Une réglementation technique globale** 22

1.2.2 **Une réglementation évolutive** 23

CHAPITRE 2 Projet d'écoquartier et projet européen Class 1 27

2.1 **Stratégie énergétique territoriale** 27

2.2 **Projet d'écoquartier Stenloese Sud** 28

2.2.1 **Localisation** 28

2.2.2 **Prescriptions concernant l'énergie** 31

2.3 **Projet Class 1** 32

2.3.1 **Partenariat avec des industriels danois** 32

2.3.2 **Construction d'équipements publics** 33

2.3.3 **Aménagement** 33

2.3.4 **Production d'énergies renouvelables** ... 33

2.3.5 **Réhabilitation de bâtiments communaux** ... 34

2.3.6 **Programme du projet Class 1** ... 35

2.4 **Objectifs énergétiques des opérations de démonstration** ... 36

2.4.1 **Documents d'urbanisme réglementaires, labels et partenariats** ... 36

2.4.2 **Performance énergétique des constructions neuves** ... 37

2.4.3 **Réhabilitation énergétique exemplaire avec production photovoltaïque pour des bâtiments publics** ... 37

2.5 **Étapes du projet** ... 38

CHAPITRE 3 Partenariat avec des industriels locaux ... 41

3.1 **VMC double flux avec récupération de chaleur et pompe à chaleur réversible pour maisons individuelles de Genvex** ... 42

3.2 **Menuiseries à triple vitrage de PRO TEC** ... 43

3.3 **Blocs isolants pour planchers bas et fondations de Dansk Leca (Weber Saint-Gobain)** ... 44

3.4 **Canalisations de réseaux de chaleur Logstor pour des logements à basse consommation** ... 45

3.5 **Transformation et optimisation d'une chaufferie bois en une unité de gazéification de biomasse en cogénération par BioSynergi** ... 47

3.6 **Adaptation des gestionnaires d'énergie aux maisons à basse consommation par Electronic Housekeeper (EHK)** ... 48

CHAPITRE 4 Règlements d'urbanisme, cahiers des charges et de prescriptions ... 51

4.1 **Définition des objectifs environnementaux de Stenloese Sud** ... 51

4.1.1 **Étude d'impact** ... 51

4.1.2 **Objectifs environnementaux** ... 52

4.1.3 **Incidence du choix de la définition du développement durable sur un projet d'écoquartier** ... 53

4.2 **Intégration des exigences énergétiques dans les documents d'urbanisme et cahiers de prescriptions** ... 57

4.2.1 **Un volet énergétique dans les documents d'urbanisme** ... 57

4.2.2 **Champs de compétence des collectivités danoises sur les cahiers de prescriptions annexés aux contrats de cession** ... 58

4.2.2.1 Plan du cahier de prescriptions pour le projet d'écoquartier Stenloese Sud ... 59

4.2.2.2 Engagement de la commune ... 59

CHAPITRE 5 Labels et certifications ... 63
5.1 Labellisation et certification au Danemark ... 63
5.2 Écolabel européen *EU-Flower* ... 64
5.3 Certification allemande DGNB ... 66
5.3.1 Approche de développement durable ... 66
5.3.1.1 Qualité environnementale ... 66
5.3.1.2 Qualité économique ... 67
5.3.1.3 Qualité socioculturelle et fonctionnelle ... 67
5.3.1.4 Qualité technique ... 67
5.3.1.5 Qualité de la démarche ... 67
5.3.1.6 Qualité du site ... 68
5.3.2 Échelles de pondération et de notation de la DGNB ... 68
5.3.3 Gestion par un organisme à but non lucratif ... 69
5.3.4 Formations pour diffuser le savoir-faire et partager une culture de l'évaluation ... 69
5.3.5 Échelle du quartier ... 70

CHAPITRE 6 Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) ... 71
6.1 Optimisation des programmes neufs ... 72
6.2 Optimisation des programmes de réhabilitation ... 72
6.2.1 Approche macroéconomique ... 73
6.2.2 Approche microéconomique ou financière ... 73
6.2.3 Choix du mode de calcul ... 74

PARTIE 2 Construction neuve ... 77

CHAPITRE 7 Guide de conception de bâtiments à très faible consommation d'énergie ... 79
7.1 Contenu ... 79
7.2 Recommandations techniques ... 81

CHAPITRE 8 Optimisation énergétique et analyse économique ... 83
8.1 Optimisation énergétique pour un bâtiment de référence ... 83
8.2 Analyse économique ... 87
8.2.1 Calculs effectués pour les phases 1 et 2 du projet ... 88
8.2.2 Calculs effectués pour les phases 3 à 5 du projet ... 89

CHAPITRE 9 Construction d'une école à très faible consommation d'énergie ... 95

9.1 Système constructif ... 97

9.2 Chauffage, ventilation, ECS ... 99

9.3 Qualité de l'air intérieur ... 99

CHAPITRE 10 Construction d'un centre d'activités pour personnes âgées ... 101

10.1 Enveloppe et coefficient *U* ... 103

10.2 Chauffage, ventilation, ECS ... 105

CHAPITRE 11 Huit bâtiments quasi passifs de 65 logements sociaux ... 107

11.1 Système constructif ... 109

11.2 Enveloppe – Coefficient *U* ... 110

11.3 Chauffage, ventilation, ECS ... 110

11.4 Suivi et analyse des consommations d'énergie ... 110

11.4.1 Mode de suivi, période et fiabilité ... 110

11.4.2 Méthode d'analyse des consommations d'énergie ... 111

11.4.2.1 Suppression des données irréalistes ou « suspectes » ... 111

11.4.2.2 Combinaison de deux méthodes : analyse statistique avec tests de sensibilité et recherche de corrélations ... 112

11.4.2.3 Estimation des consommations pour les différents usages ... 114

11.5 Consommation d'énergie pour le chauffage ... 115

11.5.1 Première année de suivi ou d'occupation (2009-2010) ... 115

11.5.2 Deux premières années d'occupation ... 115

11.5.3 Troisième année de suivi ... 117

11.5.4 Sur les trois années de suivi (juillet 2009 – juin 2012) ... 117

11.5.4.1 Conformité aux attentes ... 117

11.5.4.2 Disparités selon les ménages ... 118

11.5.5 Analyse des différences entre consommations estimées et réelles ... 120

11.6 Consommation d'énergie pour l'ECS ... 120

11.7 Consommation d'électricité spécifique ... 122

11.8 Comparaison des consommations réelles et estimées d'énergie pour le chauffage, la ventilation et l'ECS ... 125

CHAPITRE 12 Construction de 42 maisons individuelles à très basse consommation d'énergie ... 127

12.1 Prescriptions de la commune d'Egedal ... 128

12.2 Exemples de maison individuelle ... 129

12.2.1 Maison Kildebraekken 2 ... 129
12.2.1.1 Enveloppe – Coefficient *U* ... 131
12.2.1.2 Chauffage – VMC ... 132

12.2.2 Maison passive Kaerdalen 17 ... 133
12.2.2.1 Enveloppe – Coefficient *U* ... 134
12.2.2.2 Chauffage – VMC ... 135

12.2.3 Maison Kaerdalen 23a ... 137
12.2.3.1 Enveloppe – Coefficient *U* ... 138
12.2.3.2 Chauffage – VMC ... 138

12.2.4 Maison Mosekaeret 6 ... 140
12.2.4.1 Enveloppe – Coefficient *U* ... 141
12.2.4.2 Chauffage – VMC ... 141

12.2.5 Maison Kærdalen 23b ... 142
12.2.5.1 Enveloppe – Coefficient *U* ... 143
12.2.5.2 Chauffage – VMC ... 144

12.2.6 Maison Mosekæret 26 ... 144

12.3 Suivi des consommations d'énergie de 17 maisons ... 150

12.3.1 Méthode de calcul de la part du chauffage dans la consommation d'énergie ... 151

12.3.2 Écarts entre consommations estimées et consommations réelles ... 152
12.3.2.1 Impact de la température des logements ... 152
12.3.2.2 Impact des conditions météorologiques ... 152

12.3.3 Correction des consommations d'énergie réelles avec les données météorologiques retenues pour les estimations ... 153

12.4 Suivi des consommations d'énergie d'une maison ... 154

12.4.1 Description de la maison ... 154

12.4.2 Comparaison des consommations d'énergie calculées avec les consommations réelles ... 155
12.4.2.1 ECS ... 156
12.4.2.2 Apports internes ... 156

12.4.3 Écarts entre prévisions et consommations réelles ... 157

12.5 Suivi des températures et de la qualité de l'air intérieur de 7 maisons ... 157

12.5.1 **Température** ... 157
12.5.2 **Taux d'humidité relative** ... 158
12.5.3 **Taux de concentration en CO_2** ... 160
12.5.4 **Renouvellement d'air** ... 160
12.5.5 **Comparaison des consommations d'énergie avec celles d'un autre lotissement danois** ... 162
12.6 **Écarts entre consommations estimées et consommations réelles** ... 162

CHAPITRE 13 **Enquêtes de satisfaction et analyse socioéconomique** ... 163

13.1 **Analyse socioéconomique** ... 163
13.1.1 **Profil des nouveaux habitants à Stenloese Sud** ... 163
13.1.1.1 Propriétaires ayant fait construire une maison ... 163
13.1.1.2 Locataires de logement social ... 164
13.1.1.3 Nouveaux habitants ... 164
13.1.2 **Sensibilité environnementale des habitants** ... 165
13.1.3 **Entreprises de construction** ... 166
13.2 **Enquêtes de satisfaction auprès des ménages** ... 166
13.2.1 **Première enquête** ... 167
13.2.1.1 Taux de satisfaction ... 167
13.2.1.2 Confort thermique ... 167
13.2.1.3 Comparaison avec le logement précédemment occupé ... 169
13.2.1.4 Équipements techniques ... 170
13.2.1.5 Qualité des notices d'utilisation et des informations sur les équipements techniques ... 171
13.2.1.6 Comportement et souhaits des ménages ... 171
13.2.2 **Seconde enquête** ... 172
13.2.3 **Conclusions des deux enquêtes** ... 172
13.3 **Comparaison avec d'autres logements du même type** ... 174

CHAPITRE 14 **Enseignements du projet d'écoquartier et du projet Class 1 et recommandations** ... 177

14.1 **Critères de choix d'un logement par les ménages** ... 177
14.2 **Satisfaction des ménages mais faible retour sur investissement** ... 177
14.3 **Comportements / souhaits des ménages** ... 178
14.4 **Nouveaux systèmes, équipements et produits énergétiques** ... 179
14.4.1 **Compteur intelligent et gestionnaire d'énergie** ... 179
14.4.2 **Chauffage – Ventilation** ... 179

14.5 **Rôle des collectivités locales et ingénierie** ... 181
14.5.1 **Élaboration d'une stratégie territoriale énergétique** ... 181
14.5.2 **Ingénierie des projets d'aménagement et de construction** ... 182
14.5.3 **Fiabilité et transparence des estimations pour (re)donner confiance** ... 182
14.6 **Conception des bâtiments et nouveaux équipements** ... 183
14.6.1 **Besoin de formation** ... 183
14.6.2 **Problème majeur : le confort d'été** ... 183
14.6.3 **EPBD et optimisation de la conception** ... 184
14.7 **Changement de paradigme** ... 184

PARTIE 3 **Production locale d'énergie** ... 187

CHAPITRE 15 Production d'énergies renouvelables ... 189
15.1 **Panneaux photovoltaïques sur 9 bâtiments publics** ... 189
15.2 **Nouvelle centrale de cogénération biomasse et solaire** ... 196

PARTIE 4 **Réhabilitation énergétique** ... 197

CHAPITRE 16 Réhabilitation exemplaire de 7 bâtiments publics ... 199
16.1 **Choix des bâtiments et de l'équipe de maîtrise d'œuvre** ... 199
16.2 **Réhabilitation de l'école primaire Stengårds** ... 200
16.2.1 **Travaux et économies d'énergie** ... 201
16.2.2 **Contrôle de la qualité de l'air intérieur** ... 204
16.2.2.1 Enquêtes de satisfaction ... 204
16.2.2.2 Campagne de mesures ... 204
16.3 **Autres travaux de réhabilitation** ... 208
16.3.1 **École Bækkegårds** ... 208
16.3.2 **Travaux sur les autres écoles ou centres d'éducation** ... 210
16.4 **Synthèse sur les économies d'énergie des travaux de réhabilitation** ... 212
16.5 **Synthèse sur le coût des travaux** ... 215

CHAPITRE 17 Optimisation des programmes de réhabilitation et stratégie territoriale vers la transition énergétique ... 217
17.1 **Optimisation des programmes de réhabilitation** ... 217
17.1.1 **Analyse en coût global : une exigence de l'EPBD et un outil de la transition énergétique** ... 218

17.1.1.1 Période de calcul ou horizon ... 220
17.1.1.2 Taux d'actualisation ... 220
17.1.1.3 Externalités ... 221
17.1.1.4 Aides publiques ... 222
17.1.1.5 Évolution des prix de l'énergie ... 222
17.1.2 Calcul de l'optimum technico-économique (ou coût optimal) ... 223
17.1.2.1 Calcul avec la valeur actualisée nette (VAN) ... 223
17.1.2.2 Calcul avec le coût global ... 224
17.1.2.3 Seuils de consommation ... 224
17.1.2.4 Élaboration de différents scénarios de réhabilitation ... 226
17.2 Stratégies territoriales et patrimoniales de réhabilitation ... 226
17.3 Analyse en coût global ... 228
17.3.1 Une stratégie ambitieuse, optimisée et équitable ... 228
17.3.2 Optimisation de l'utilisation des fonds publics ... 229
17.3.3 Développement de la compétitivité et de l'emploi ... 229
17.3.4 Un outil pour la transition énergétique ... 229
Conclusion ... 231
ANNEXE A1 Programme européen Concerto ... 235
A1.1 Objectifs ... 235
A1.1.1 Facteur 4 et « trois fois vingt » ... 235
A1.1.2 Démarches de développement durable ... 236
A1.1.3 Planification territoriale énergétique ... 236
A1.1.4 Transversalité ... 236
A1.2 Obligations ... 237
A1.3 Collectivités soutenues financièrement ... 237
ANNEXE A2 Partenariat du projet Class 1 ... 239
A2.1 Rôles des partenaires ... 239
A2.2 Coordinateurs ... 241
A2.3 Correspondants pour la France ... 242
Glossaire ... 243
Index ... 247

Les collectivités locales des pays européens, notamment de nombreuses villes au Danemark, se sont fixé des objectifs ambitieux de réduction de leur consommation d'énergie et de leurs émissions de gaz à effet de serre ; cependant, le choix et la mise en œuvre d'actions concrètes s'avèrent complexes.

Le récent projet Class 1 *(Cost-effective Low-energy Advanced Sustainable Solutions)*, financé par la Commission européenne dans le cadre du programme Concerto, illustre cet engagement. Il a porté sur un projet d'écoquartier de la ville d'Egedal au Danemark ; ce projet comprend la mise au point de 6 technologies ou produits (planchers bas isolants, réseau de chaleur biomasse et canalisations adaptés aux faibles consommations, systèmes de gestion énergétique, etc.), l'élaboration d'un guide de conception à destination des particuliers, la construction de bâtiments résidentiels et tertiaires à ultrabasse consommation d'énergie, la réhabilitation énergétique exemplaire de bâtiments publics, la pose de panneaux photovoltaïques…

Cette étude en présente les résultats à travers un retour sur expérience enrichissant. Outil de travail et de référence à la fois conceptuel, méthodologique et opérationnel, elle dresse un panorama des aspects techniques, sociaux et économiques reproductibles en France. Scindée en quatre parties, elle traite successivement de :
– la démarche mise en œuvre (objectifs énergétiques, partenaires industriels et produits développés pour le projet) ainsi que son contexte (réglementation thermique nationale, programme européen Concerto, labels et certifications, Directive européenne sur la performance énergétique, etc.) ainsi que des étapes du projet d'écoquartier ;
– la construction de bâtiments à énergie proche de zéro (école, logements sociaux, maisons individuelles, etc.) ainsi que le suivi et l'évaluation des consommations et du niveau de confort ;
– la production locale d'énergie ;
– la réhabilitation énergétique exemplaire de bâtiments publics et l'élaboration d'une stratégie énergétique territoriale.

Chaque partie débute par la présentation des résultats de chaque projet puis se conclut sur des recommandations opérationnelles et des propositions d'actions de transition énergétique à destination des professionnels et des collectivités.

Docteur en économie, **Philippe Outrequin** est expert des questions d'énergie et du développement urbain durable. Il a créé La Calade, un bureau de conseil spécialisé dans l'aménagement durable et les stratégies énergétiques.
Catherine Charlot-Valdieu, économiste, est présidente de l'association Suden pour la promotion du développement urbain durable.
Ils ont tous deux publié de nombreux ouvrages aux Éditions du Moniteur : *Coût global des bâtiments et des projets d'aménagement* (2013), *La réhabilitation énergétique des logements* (2012), *Concevoir et évaluer un projet d'écoquartier* (2012) et *L'Urbanisme durable* (2011).

Extrait du sommaire

Partie 1 ▶ Contexte et objectifs du projet d'écoquartier Stenloese Sud : Objectifs d'efficacité énergétique – Projet d'écoquartier et projet européen Class 1 – Partenariat avec des industriels locaux – Règlements d'urbanisme, cahiers des charges et prescriptions
Partie 2 ▶ Construction neuve : Optimisation énergétique et analyse économique – Construction de bâtiments tertiaires et résidentiels – Enquêtes de motivation et de satisfaction des habitants – Enseignement et recommandations
Partie 3 ▶ Production locale d'énergie
Partie 4 ▶ Réhabilitation énergétique exemplaire : Détail des travaux sur 7 bâtiments publics – Optimisation des programmes de réhabilitation et stratégie territoriale vers la transition énergétique

ISBN 978-2-281-11772-1
9 782281 117721
EDITIONS LE MONITEUR
editionsdumoniteur.com