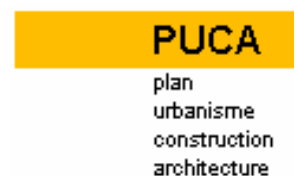


Comparaison internationale  
Bâtiment et énergie

**C4 – SYSTEMES CONSTRUCTIFS  
COMPARES**

Auteur : Jean-Luc Salagnac (jean-luc.salagnac@cstb.fr)

Expert : S. Svendsen (Univ. Technologique du Danemark)



# Sommaire

Introduction.....	76
Etape 1 - Contexte :.....	77
Etape 2 - Contenu : .....	78
Etape 3 - Mise en œuvre .....	81
Etape 4 - Evaluation : .....	82
Etape 5 - Réflexion critique sur les 4 étapes .....	83
Etape 6 - Conditions de la transposition en France .....	83

## Introduction

L'obtention de performances énergétiques supérieures à celle des bâtiments courants résulte de la mise en œuvre de dispositions prises à tous les stades d'un projet de construction : depuis la programmation jusqu'à la maintenance en passant par la conception et la mise en œuvre des partis techniques choisis.

La mise en cohérence de ces dispositions, garante de la maîtrise de l'ensemble du projet dans le cadre de son économie, fait l'objet d'un rapport PREBAT spécifique sur l'approche intégrée [1].

Le présent rapport aborde une question moins large : celle de l'incidence du parti constructif sur l'obtention de la performance attendue.

Une lecture transversale des analyses SWOT du rapport Benchmarking PREBAT n°1 [2] met en évidence une faiblesse commune à plusieurs des sous-ensembles analysés. Il s'agit de la sensibilité de la performance des ouvrages à la qualité de la mise en œuvre des produits et procédés.

Les manières de réaliser ces ouvrages sont très nombreuses comme l'évoque le rapport. La technicité requise est implicitement une variable du problème. Un procédé potentiellement performant qui serait très exigeant en matière de qualification, d'outillage, de conditions de chantier pourrait ne pas révéler sa performance du fait de la difficulté à réunir toutes les conditions requises.

Les procédés de construction dominants partagent cette caractéristique de permettre, dans des conditions économiques compétitives, d'être tolérant (dans certaines limites) à des défauts résultant d'une conception et d'une mise en œuvre imparfaites. La technicité requise garantit une appropriation étendue des conditions de mise en œuvre tout en permettant d'obtenir une qualité satisfaisante pour l'occupant.

Dans la perspective de réalisation de bâtiments présentant des performances plus élevées que celle des bâtiments courants actuels, il est légitime de s'interroger sur les limites éventuelles de performances des procédés dominants afin d'évaluer la marge de manœuvre qu'ils présentent. Jusqu'où peut-on « pousser » ces procédés ? A partir de quel niveau faut-il envisager de revoir ces partis constructifs ? Comment devrait-on alors poser la question du développement de systèmes de substitution ?

Le présent rapport aborde ces questions à travers l'examen du cas danois. Ce pays s'est en effet posé les questions qui viennent d'être évoquées et y a apporté des réponses dont on peut tirer des enseignements pour la situation française.

Après avoir décrit le contexte danois sous plusieurs aspects : exigences de performances, organisation des acteurs, méthode choisie, résultats obtenus, nous en analyserons les atouts et terminerons sur des réflexions relatives à la transposition de certains de ces éléments.

Les éléments relatifs à la situation danoise proviennent du rapport établi par des spécialistes de ces questions à l'université technique du Danemark [3].

Les points de vue développés dans ce rapport concernent pour l'essentiel le logement individuel et le logement collectif. Quelques éléments relatifs au non-résidentiel sont également fournis.

## Etape 1 - Contexte :

Le Danemark est bien entendu confronté à l'obligation d'améliorer les performances thermiques à la fois du parc existant et des constructions neuves. Comme en France, la réglementation est un vecteur essentiel de ces évolutions.

A dater du 1<sup>er</sup> janvier 2006, une nouvelle réglementation est entrée en vigueur. Elle introduit des exigences tant pour les logements neufs que pour les logements existants.

La référence aux niveaux de performance des parois a été abandonnée pour être remplacée par une expression d'exigences relatives à la consommation en kWh/m<sup>2</sup>/an. Cette consommation inclut les énergies nécessaires au chauffage, au rafraîchissement, à la production d'ecs et à la ventilation. Sont ainsi prises en compte les pertes des canalisations et autres réservoirs de stockage de chaleur.

Le tableau 1 présente l'évolution de ces exigences pour les bâtiments neufs. Pour l'année 1985, l'expression donnée n'est pas celle figurant dans la réglementation de l'époque puisque la méthode était différente de celle introduite en 2006. Cette expression « reconstituée » permet néanmoins de situer les évolutions. La lettre *A* désigne la surface du logement (m<sup>2</sup>).

Référence	Exigence (kWh/m <sup>2</sup> /an)	Valeur pour A= 100 m <sup>2</sup> (kWh/m <sup>2</sup> /an)
Building regulations 1995 (BR95):	$95 + \frac{3000}{A}$	125
Building regulations 2006 (BR06):	$70 + \frac{2200}{A}$	92
Low energy class 2 (BR06):	$50 + \frac{1600}{A}$	66
Low energy class 1 (BR06):	$35 + \frac{1100}{A}$	46

Tableau 1 : évolution des exigences réglementaires danoises (BR : Building Regulation)

Outre des exigences de base plus sévères, la réglementation de 2006 (BR06) introduit deux classes de bâtiments particulièrement performants :

- classe 2 : niveau inférieur de 25% à la base
- classe 1 : niveau inférieur de 50% à la base

Cette disposition est destinée à anticiper les futures exigences. L'ambition est qu'en 2015, le plancher de référence soit la classe 1 de la réglementation de 2006.

Pour ce qui est des bâtiments existants, secteur bien entendu considéré comme prioritaire, la situation danoise est la suivante : 75% des logements actuels ont été construits avant 1979, date du premier renforcement de la réglementation thermique. Le niveau d'isolation des 25% restant est évalué à 50% des exigences introduites en 2006.

Les éléments présentés au chapitre suivant sur les pistes suivies pour améliorer la situation résultent d'une approche collective et « nordiquement » consensuelle des problèmes.

A noter que nos collègues danois du DTU insistent sur la dynamique associée à ces objectifs ambitieux. Dynamique qui repose sur une coopération étroite entre professionnels de la construction et le monde de la recherche avec en perspective la mise au point de solutions intégrées exportables en Europe.

## Etape 2 - Contenu :

Tant pour ce qui est des **bâtiments existants** que des **bâtiments neufs**, les efforts se portent naturellement vers un renforcement de l'isolation de l'enveloppe, mesure accompagnée de la mise en place d'une ventilation avec récupération de chaleur sur air extrait et d'un traitement des pertes thermiques des équipements (ballons d'ecs, canalisations).

Le point faible des opérations de réhabilitation est évidemment le renforcement de l'isolation thermique des planchers bas et des fondations; ouvrages dont le traitement est plus aisé pour un bâtiment neuf.

Les voies suivies par les danois s'inscrivent de manière pragmatique dans le développement de méthodes venant se greffer sur les pratiques courantes dans ce pays, elles-mêmes issues des techniques traditionnelles développées sur la base des ressources naturelles du pays : abondance d'argile, peu de bois (contrairement aux autres pays scandinaves).

Le **mur** en briques de terre cuite est ainsi l'élément de référence au Danemark. Parmi les moteurs des évolutions de cette technologie, les préoccupations énergétiques ont leur part puisque, dès 1961, la première réglementation exigeait un coefficient U de 1.00 W/m<sup>2</sup>.K.

En 1977, dans le sillage du choc pétrolier de 1973, cette valeur était ramenée à 0.40 W/m<sup>2</sup>.K. Performance satisfaite par un mur double comprenant 85 mm d'isolant.

En 1995, 125 mm d'isolant étaient nécessaire pour atteindre une valeur de U de à 0.30 W/m<sup>2</sup>.K.

Les exigences introduites en 2006 correspondent à des valeurs de U de à 0.20 W/m<sup>2</sup>.K, nécessitant 190 mm d'isolant.

La technologie du mur double accepte ces évolutions apparemment sans problème. Evolution qui pourrait être prolongée sans difficulté jusqu'à 250 mm d'isolant (figure 1). Cette limite pourrait être poussée techniquement à 400 mm avant de rencontrer des problèmes de liaison mécanique entre les deux murs. L'intérêt économique viendrait cependant mettre un frein à cet accroissement de l'épaisseur d'isolant avant d'atteindre 400 mm. Un des aspects de cette limite économique est lié au coût de réalisation de fondations adaptées.



Figure 1 : travaux en cours de mise en œuvre d'un mur double sur un bâtiment existant avec une épaisseur d'isolant de 250mm (source DTU [3])

Une autre évolution se fait jour. L'importance de la fonction esthétique traditionnelle du mur extérieur maçonné en briques étant très forte, des tentatives sont en cours pour assurer les autres fonctions de cet ouvrage (mécanique, protection contre les agents climatiques) par une structure bois associée à un parement en briques.

Un travail conduit au DTU en collaboration avec un constructeur a abouti à faire évoluer le mur double initial (épaisseur 410 mm pour une couche d'isolant de 190 mm) vers un mur composite bois/parement de 510 mm d'épaisseur pour 365 mm d'isolant. Le gain d'isolant est ainsi de 175 mm pour une augmentation de l'épaisseur totale du mur de 100 mm.

En compétition avec le mur double traditionnel, solution dominante notamment pour les logements individuels, d'autres procédés sont utilisés de manière plus marginale au Danemark comme des structures à ossature bois ou acier. On trouvera en annexe des éléments statistiques sur les procédés constructifs danois.

Les **fondations** présentent des difficultés d'amélioration des performances thermiques. Le DTU, en relation avec les constructeurs danois a examiné cette question pour déterminer, dans leur contexte (bâtiments bas (voir annexe), pas d'aléa sismique) des solutions optimales. Les résultats de ces réflexions est présenté figure 2 pour d'une part les structures lourdes issues des solutions traditionnelles, d'autre part des structures légères.

Trois types de fondation ont été retenus :

- fondation large destinée à reprendre des efforts transmis par les deux murs du mur double,
- fondation étroite destinée à reprendre les efforts transmis par la structure interne,
- fondation à redan assurant la reprise de la structure externe.

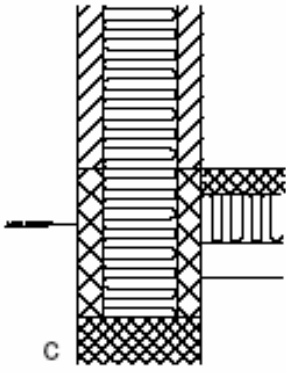
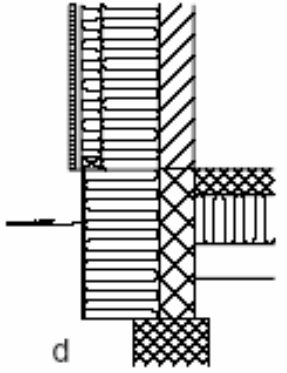
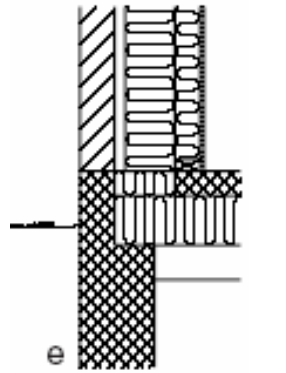
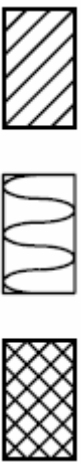
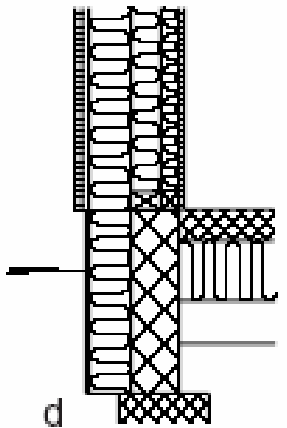
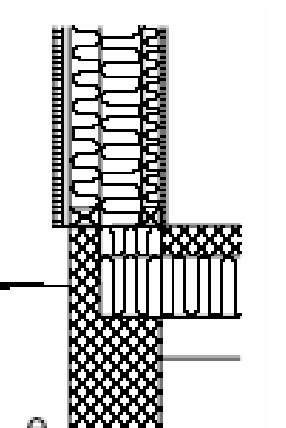
Fondation large		Fondation étroite		Fondation avec redan	
 <p>c</p> <p>Mur double avec isolant</p>		 <p>d</p> <p>Mur porteur intérieur</p>		 <p>e</p> <p>Mur porteur extérieur</p>	
<p><b>Les plus</b></p> <p>Technique éprouvée</p> <p>Robustesse</p>	<p><b>Les moins</b></p> <p>Augmentation de l'épaisseur de la fondation avec celle de l'isolant</p> <p>Une partie de l'inertie est reportée à l'extérieur</p>	<p><b>Les plus</b></p> <p>Simplicité structurale</p> <p>Nombreuses possibilités de peau externe résistante à la pluie et au vent</p>	<p><b>Les moins</b></p> <p>Difficulté de traitement des points singuliers (baies, pied de mur, fixation de la peau extérieure)</p>	<p><b>Les plus</b></p> <p>Réduction des pertes linéiques</p> <p>Façade externe robuste</p>	<p><b>Les moins</b></p> <p>Difficulté de mise en place et de protection de l'écran pare-vapeur</p> <p>Complexité structurale</p> <p>Inertie thermique reportée à l'extérieur</p>
 <p>LEGENDE</p> <p>Porteur Non isolant</p> <p>Isolant Non porteur</p> <p>Isolant Porteur</p>		 <p>d</p> <p>Structure légère avec élément porteur intérieur</p>		 <p>e</p> <p>Structure légère avec élément porteur extérieur</p>	
		<p><b>Les plus</b></p> <p>Simplicité structurale</p> <p>Nombreuses possibilités de peau externe résistante à la pluie et au vent</p>	<p><b>Les moins</b></p> <p>Difficulté de traitement des points singuliers (baies, pied de mur)</p> <p>Faible inertie</p>	<p><b>Les plus</b></p> <p>Réduction des pertes linéiques</p> <p>Mise en place façade ayant l'apparence d'une maçonnerie en briques sans fondation supplémentaire</p>	<p><b>Les moins</b></p> <p>Difficulté de mise en place et de protection de l'écran pare-vapeur</p> <p>Complexité structurale</p> <p>Faible inertie</p>

Figure 2 principes de fondations présentant de bonnes performances thermiques dans le contexte danois

Outres les murs et les fondations, les autres ouvrages des maisons individuelles font l'objet d'évolutions sur la base des considérations suivantes :

- **les planchers bas**, dont la contribution au bilan thermique croît au fur et à mesure que les performances des murs (et plus généralement de l'enveloppe) sont renforcées. Les possibilités d'amélioration par renforcement de l'isolation sont cependant grevées par des considérations mécaniques. Dans le contexte danois, un plancher bas non chauffant, constitué d'une dalle armée de 100 mm d'épaisseur, reposant sur 200 mm de polystyrène mis en place sur un lit de granulats d'argile expansé (150 à 300 mm) constitue un optimum. L'épaisseur d'isolant serait plus importante pour un plancher chauffant.
- **la toiture**, dont l'isolation est déjà assurée (référence BR95) par 205 à 300 mm d'isolant. La perspective de pousser cette épaisseur à 500 mm semble acquise.
- **les fenêtres**, dont l'amélioration passe à la fois par l'utilisation de parties vitrées à fortes performances (propriétés et nombre des vitrages) désormais disponibles couramment et par un traitement des ponts thermiques au niveau de la liaison avec les éléments de structure,
- **la ventilation**, dont l'importance relative croît avec l'amélioration générale de l'isolation de l'enveloppe. L'utilisation d'échangeurs sur air extrait s'impose naturellement dès lors qu'une performance thermique élevée est recherchée,
- **les réseaux et les équipements**, qui présentent un potentiel de réduction de pertes thermiques, sont optimisés en termes de pertes thermiques par une réflexion sur la géométrie, les parcours et le niveau d'isolation.

Le DTU estime qu'une économie de chauffage de 70 % par rapport aux exigences BR95 pour une maison individuelle est réalisable sans difficulté technique pour un surinvestissement limité (2 à 6 % sur une base de 175 000 €).

Pour ce qui est des logements collectifs, le mur double a été adapté en réalisant une structure porteuse en béton, « habillée » par un mur en brique. L'isolation est placée entre les deux ouvrages. Une variante plus économique consiste à réaliser la peau extérieure par des panneaux en béton accrochés à la structure. Cette solution présente des ponts thermiques.

La question des bâtiments non résidentiels à hautes performances énergétiques est encore en devenir du fait notamment de l'importance de la ventilation suivant les destinations.

## Etape 3 - Mise en œuvre

Les travaux relatifs aux bâtiments à hautes performances énergétiques au Danemark ont été principalement fondés sur l'évolution des techniques dominantes actuelles plus que par le souhait d'introduire une révolution dans les modes constructifs.

Ce choix apporte a priori une garantie quant à l'appropriation des solutions décrites tant au stade de la conception que lors de la mise en œuvre sur chantier.

Par ailleurs, l'habitude de coopération entre concepteurs (architecte, ingénieurs BE) et entreprises contribue à créer les conditions d'un bon déroulement des opérations.

Ce contexte est a priori de garantir l'obtention de performances élevées : les règles du jeu, les repères, ne sont pas fondamentalement perturbés par rapport à un chantier traditionnel et l'attention peut plus facilement être portée sur le soin à apporter à l'exécution d'ouvrages comparables à ce qui se fait traditionnellement sans avoir à s'approprier un mode constructif nouveau.

Malgré ce contexte favorable, le DTU pointe cependant quelques améliorations à apporter lors de ces phases.

**La formation des compagnons** est notamment perfectible comme l'illustrent les problèmes rencontrés lors de la mise en œuvre du pare-vapeur dans des bâtiments très isolés dotés d'un système de récupération d'énergie sur air extrait.

Faute d'information suffisante sur le rôle joué par le pare-vapeur dans la performance d'étanchéité à l'air des bâtiments (en complément de son rôle premier), un manque de soin lors de la pose n'a pas permis d'atteindre les bas niveaux de fuite d'air escomptés.

Cet exemple illustre l'importance de la continuité de la chaîne d'information entre la phase de conception et le chantier. Vigilance d'autant plus importante que cela concerne des ouvrages qui sont très voisins des ouvrages réalisés traditionnellement.

**La formation des occupants** se révèle également être un enjeu d'après l'expérience danoise. La encore, la continuité de l'information depuis la conception jusqu'à l'utilisateur mérite une attention particulière.

## Etape 4 - Evaluation :

La technicité des études de conception et d'optimisation ne change pas de nature en passant d'une opération traditionnelle à une opération « hautes performances énergétiques ». Sans doute faut-il cependant plus insister que d'habitude sur la communication d'information en passant d'une phase à une autre de l'opération. Au-delà de la seule communication, il y a peut-être à réfléchir à la qualité du message reçu.

Pour pallier aux défauts « sournois » comme ceux résultant d'une pose imparfaite du pare-vapeur, la réglementation 2006 impose un essai de surpression sur le bâtiment construit, essai destiné à qualifier le niveau d'étanchéité à l'air.

En dehors de quelques situations où le défaut d'étanchéité à l'air est patent (brèche, absence manifeste de joint), un défaut d'étanchéité à l'air peut être très difficile à corriger sur un bâtiment terminé. La réalisation du test est destinée à rendre très vigilants les entrepreneurs.

Dans le même esprit et afin de garantir le maintien des performances dans le temps, il est envisagé de rendre obligatoires des mesures de maintenance et d'entretien des ouvrages et systèmes concourant à l'obtention de la performance thermique.

L'instrumentation, le monitoring de bâtiments se pratique dans quelques projets de recherche mais il n'est pas envisagé de développer ce type d'approche pour des opérations courantes du fait du coût de l'instrumentation et de l'exploitation des données.

## Etape 5 - Réflexion critique sur les 4 étapes

L'expérience danoise a ceci d'intéressant qu'elle est très pragmatique. Elle est fondée sur une posture qui consiste à dire : avant que d'imaginer d'autres modes constructifs, regardons jusqu'où peuvent être poussés les procédés actuellement dominants.

Cette posture modeste et sage prend acte d'une réalité : le secteur de la construction innove en permanence mais la diffusion de l'innovation est lente, voire très lente. Aussi, les systèmes dominants actuels ont-ils été introduits il y a souvent plusieurs décennies et ils sont ancrés dans l'histoire et la tradition.

Il se trouve par ailleurs que la technique du mur double est propice à l'exercice en ce qu'elle présente un potentiel d'évolution sans révolution.

Modeste et sage, il est par ailleurs utile de le rester de manière à ce que les évolutions indispensables soient néanmoins bien intégrées et sans faille tout le long de la chaîne d'acteurs.

Les danois restent cependant ouverts à d'autres voies comme en atteste les éléments rapportés par le DTU.

## Etape 6 - Conditions de la transposition en France

Nous examinerons la question de la transposition de la démarche danoise sous trois aspects :

- la méthode générale,
- la technique du mur double,
- la coopération entre acteurs,

La **méthode générale** est comprise ici comme la posture consistant à examiner le potentiel de progrès recelé par les procédés constructifs dominants avant d'imaginer d'autres modes constructifs, a priori en rupture avec ce qui se fait de manière courante.

La sagesse de cette posture lui confère un caractère quasi universel. Sa transposition dans le contexte français doit pouvoir s'opérer en principe sans obstacle.

La situation de départ est cependant bien différente. Le procédé constructif de réalisation des murs dominant en France est la maçonnerie avec isolation par l'intérieur et l'augmentation de l'épaisseur a immédiatement une incidence sur les surfaces disponibles pour les occupants.

La **technique du mur double** n'est pas inconnue de la codification française. Elle fait notamment l'objet de deux chapitres du DTU 20.1, Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs :

- Partie 1 (P 10-202-1) : Cahier des clauses techniques, chapitre 3.4.2
- Partie 2 (P 10-202-2) : Règles de calcul et dispositions constructives minimales, chapitre 4.5

La présence d'isolation dans le vide de construction est également évoquée ainsi que les précautions à prendre pour éviter les condensations non souhaitables au niveau de ces ouvrages.

Cependant, cette technique est relativement peu utilisée en France et les zones d'utilisation sont plutôt localisées au nord du pays.

Eloignée qu'elle est des pratiques dominantes, elle pâtit d'un handicap de départ pour devenir un procédé performant en France. L'existence de l'expérience danoise pourrait cependant donner lieu à réflexion compte tenu de son potentiel.

**La coopération entre acteurs** dans les pays nordiques a déjà été mentionnée à d'autres occasions pour sa réalité, sa permanence et son efficacité. Sans l'idéaliser, elle fait partie des habitudes malheureusement difficilement transposables car fondées sur des habitudes sociales et culturelles différentes de celles qui prévalent en France.

Toutes les mesures qui pourront être imaginées, mises en œuvre, évaluées, pérennisées pour celles qui en valent la peine et qui iront vers l'amélioration de la communication (pas uniquement la transmission d'information) entre acteurs ne pourront être que bénéfiques à l'ensemble du processus de construction.

Parmi ces mesures, les actions d'information destinées à rendre exigeants les maîtres d'ouvrage, les actions de formation ayant pour objectif de rappeler l'ardente obligation d'un chaînage cohérent des actions depuis la programmation jusqu'à la maintenance en passant par la conception et la mise en œuvre sont des priorités.

Il ne s'agit pas de revoir de fond en comble l'organisation de base d'un projet de construction mais de redonner aux phases traditionnelles leur contenu, leur mode d'enchaînement et de contrôle. Ce faisant, les frontières traditionnelles entre les différentes interventions peuvent être amenées à évoluer, notamment par une réflexion sur les interfaces critiques qui conditionnent l'obtention de la performance recherchée.

Bien entendu, ces réflexions de progrès doivent être menées en ne perdant pas de vue qu'un bâtiment n'est pas caractérisé que par ses performances énergétiques ...

## Références

- [1] Colombard-Prout (M.), Quénard (D.), Salagnac (J-L.) .- PREBAT, Briques technologiques : Approche intégrée .- CSTB, novembre 2007
- [2] ADEME, CSTB, PUCA .- PREBAT : comparaison internationale bâtiment et énergie, rapport n°1 .- Paris, CSTB, Juin 2006
- [3] Rose (J.), Svendsen (S.) .- Developing High Energy Performance Buildings, (rapport en anglais) .- Lyngby, DTU, février 2007