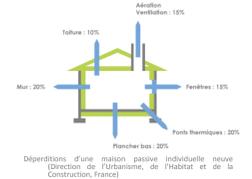


INTRODUCTION - CONTEXTE

Détail 2D-3D : Zone de l'enveloppe où la géométrie est 2D/3D et qui modifie la résistance thermique, par ailleurs uniforme (1D), de l'enveloppe → Flux de chaleur 2D/3D

Utilisation de logiciels de simulation énergétique : prédiction du comportement thermique et énergétique des bâtiments → certaines imprécisions !

- Effet stationnaire des détails 2D/3D : facilement pris en compte (coefficient de déperdition)
- Effet dynamique des détails 2D/3D : non considéré (déphasage et amortissement entre les variations de températures extérieure et intérieure)
- Pour intégrer les aspects dynamique et multidimensionnel : méthodes numériques → complexe et beaucoup de ressources pour évaluer le comportement au cours du temps
- Objectif : Méthode simple et précise de prise en compte des effets dynamiques des détails 2D/3D de l'enveloppe d'un bâtiment, afin de les intégrer dans un logiciel de simulation énergétique de bâtiments

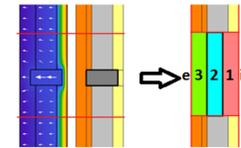


METHODOLOGIE

Méthode de structure équivalente

Principe : Structure multicouche 1D qui remplace le détail 2D/3D : mêmes comportements thermiques statique et dynamique

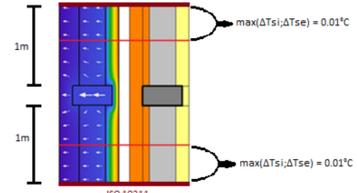
- Déterminer la résistance thermique R_m et la capacité thermique C_m de chaque couche → $e_m, \lambda_m, \rho_m, C_m$
- Paramètres valables pour toutes conditions aux limites et pour toutes périodes d'échantillonnage
- Paramètres à introduire directement dans le logiciel (pas de modification du code source)
- Pas valable si les propriétés physiques dépendent de la température
- Nombre optimal de couches : 3 → $R_1 - R_2 - R_3 - C_1 - C_2 - C_3$ à déterminer



Etapes de la méthode

1) **Définition de la géométrie à étudier** : plans de coupe (adiabatiques) à 1m de l'élément perturbateur (ISO 10211)
→ Calcul du champ de température (stationnaire, $K_f=8W/m^2K$, $K_e=23W/m^2K$, $T_i=20^\circ C$, $T_e=0^\circ C$)

2) **Redéfinition de la géométrie du détail 2D/3D**
→ Les températures de surface les plus éloignées de l'élément perturbateur ne diffèrent pas de plus de 0,01°C des températures de surface correspondantes à 1m de cet élément.



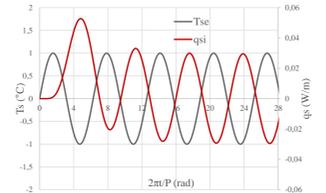
→ Réduction de la zone d'étude sans perte de précision

3) **Détermination des facteurs de structure, de la résistance thermique et de la capacité thermique du détail 2D/3D**
→ Simulation stationnaire ($T_{se} = 1, T_{si} = 0$)
→ Facteurs de structure $\Phi_{ii}, \Phi_{ie}, \Phi_{ee}$: représentent la fraction de la quantité de chaleur stockée, entre 2 états stables, à proximité de la surface intérieure, du centre et de la surface extérieure de la structure

$$\Phi_{ii} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (1-T)^2 dV \quad \Phi_{ie} = \frac{1}{C} \int_V \rho c T (1-T) dV \quad \Phi_{ee} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (T)^2 dV \quad \Phi_{ii} + 2\Phi_{ie} + \Phi_{ee} = 1$$

→ Résistance $R = \frac{1}{q_{si}} = \frac{1}{q_{se}}$ Capacité $C = \int_V \rho c dV$
→ Ce sont les 5 nombres caractérisant le comportement thermique d'une structure. Des structures possédants ces 5 mêmes nombres ont des comportements dynamiques similaires même si, en détail, elles peuvent être différentes.

4) **Détermination des caractéristiques harmoniques du détail 2D/3D**
→ Simulation dynamique : $T_{si} = 0, T_{se}$: sinusoïde d'amplitude unitaire et de période de 24h
→ Amplitude A et déphasage α (par rapport à T_{se}) du flux aux surfaces intérieure et extérieure (q_{si} et q_{se})
Exemple pour q_{si} :



5) **Calcul de la structure 1D équivalente**
→ Combinaisons adéquates de valeurs de R_1 et R_2
→ Calcul des valeurs de R_3, C_1, C_2 et C_3 correspondantes (conservation de R, C et des facteurs de structure)

$$\Phi_{ii} = \frac{1}{R^2 C} \times \left(C_1 \times \left(\frac{R_1^2}{3} + R_1 \times (R_2 + R_3) \right) + (R_2 + R_3)^2 \right) + C_2 \times \left(\frac{R_2^2}{3} + R_2 \times R_3 + R_3^2 \right) + C_3 \times \frac{R_3^2}{3}$$

$$\Phi_{ie} = \frac{1}{R^2 C} \times \left(C_1 \times \left(-\frac{R_1^2}{3} + \frac{R_1 \times R_2}{2} \right) + C_2 \times \left(-\frac{R_2^2}{3} + \frac{R_2 \times R_3}{2} + R_1 \times R_3 \right) + C_3 \times \left(-\frac{R_3^2}{3} + \frac{R_3 \times R_2}{2} \right) \right)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad C = C_1 + C_2 + C_3$$

→ Calcul des caractéristiques harmoniques correspondantes ($P=24h$)

$$\begin{bmatrix} T_{se} \\ q'_{se} \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} T_{si} \\ q'_{si} \end{bmatrix} \text{ avec } M = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} \\ M_{2,1} & M_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ E_3 & D_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ E_2 & D_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ E_1 & D_1 \end{bmatrix}$$

$$A_m = D_m = \cosh \left(\sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times R_m \times j}{P}} \right)$$

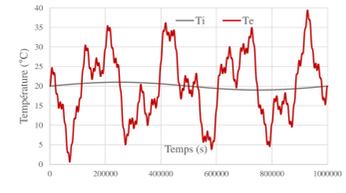
$$B_m = \sinh \left(\sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times R_m \times j}{P}} \right) / \sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times j}{R_m \times P}} \quad E_m = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times j}{R_m \times P}} \times \sinh \left(\sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times R_m \times j}{P}} \right)$$

$$q_{si}'(P) = \frac{1}{M_{1,2}} \text{ et } q_{se}'(P) = \frac{M_{2,2}}{M_{1,2}}$$

$q_{si}'(24h)$ et $q_{se}'(24h)$ sont des nombres complexes → $A_i'(24h), \alpha_i'(24h), A_e'(24h), \alpha_e'(24h)$
→ Fonction d'erreur à minimiser

$$Err = \sqrt{\left(\frac{A_i'(24h) - A_i(24h)}{A_i(24h)} \right)^2 + \left(\frac{A_e'(24h) - A_e(24h)}{A_e(24h)} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_i'(24h) - \alpha_i(24h)}{\alpha_i(24h)} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_e'(24h) - \alpha_e(24h)}{\alpha_e(24h)} \right)^2}$$

6) **Vérification de la structure équivalente**
→ Le détail 2D/3D et sa structure équivalente sous soumis aux mêmes conditions aux limites
→ Simulation dynamique ($K_f=8W/m^2K$, $K_e=23W/m^2K$)
→ Conservation du produit $K \times S$



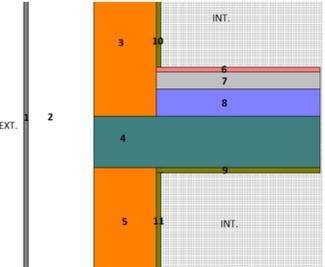
→ Comparaison des résultats en termes de flux à travers les surfaces (q_{si} et q_{se})

RESULTATS

Jonction mur extérieur – plancher d'étage

Géométrie du détail 2D

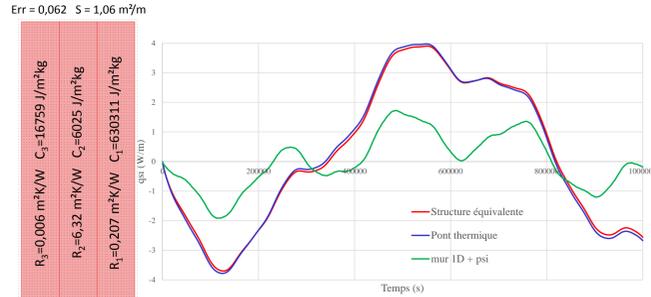
- 1: Mortier (e=1,5 cm)
 - 2: PS expansé (e=20 cm)
 - 3: Brique (e=19 cm)
 - 4: Béton armé (e=15 cm)
 - 5: Brique (e=19 cm)
 - 6: Carrelage (e=1,5 cm – l=71,5 cm)
 - 7: Béton léger (e=5 cm)
 - 8: Béton (e=8 cm)
 - 9: Plâtre (e=1,5 cm)
 - 10: Plâtre (e=1,5 cm – h=30cm)
 - 11: Plâtre (e=1,5 cm – h=45 cm)
- $U_{D} = 0,146 W/m^2K$
 $\Psi = 0,0042 W/mK$
Source : Plate-forme Maison passive



Propriétés du détail 2D

Structure 2D	$S_e = 1.06 m^2/m$	$S_{i, tot} = 2.15 m^2/m$	$S_{i, paroi courante} = 0.75 m^2/m$
	$R = 6.16 mK/W$	$C = 692281 J/mK$	$A_i = 0.0342 W/m$
	$\rightarrow 6.53 m^2K/W$	$\rightarrow 653095 J/m^2K$	$\rightarrow 0.0323 W/m^2$
	$\Phi_{ii} = 0.938$	$\Phi_{ie} = 0.0166$	$\alpha_i = -2.67 rad$
			$\alpha_e = 1.40 rad$

Structure équivalente et comparaison



	Ecart moyen	Ecart max	Ecart intégrale +	Ecart intégrale -
	W/m	W/m	%	%
q_{si}	0.087	0.14	1.3	2.9
q_{se}	0.93	2.1	5.1	5.1

- **Comparaison : simulation numérique**
 - CL : conservation du produit KS
 - Pas de temps : 2000 s
 - Période d'étude : 10⁶ s

• S_e choisie comme surface de référence pour le 1D

• Equivalente - initiale : très proche

• Equivalente meilleure que 1D + psi (considération classique)

• Erreur plus grande sur q_{se} que sur q_{si}

- $Max(q_{se}) \gg Max(q_{si})$
- Sollicitation extérieure moins bien absorbée que transmise
- Précision prioritaire sur q_{si}

• Ajout du flux solaire : précision identique

- Valeur absolue de l'intégrale des valeurs négatives est plus faible (vu l'apport du flux solaire) → erreur relative plus grande (pour q_{si})
- Précision identique sur q_{si}
- Globalement, légère amélioration de la précision sur q_{se}
- Localement, légère dégradation de la précision sur q_{se}

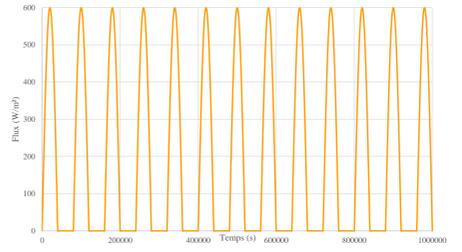
• Ambiances intérieures à t^* différente : bonne précision

- Légère dégradation de la précision sur q_{si}
- Précision identique sur q_{se}

• 4 couches : effort supplémentaire non justifié

- Diminution significative de la valeur de la fonction d'erreur
- Très légère dégradation de la précision sur q_{si}
- Amélioration de la précision sur q_{se} (surtout globalement)

Ajout d'un flux solaire



	Ecart moyen	Ecart max	Ecart intégrale +	Ecart intégrale -
	W/m	W/m	%	%
q_{si}	0.087	0.15	0.61	6.2
q_{se}	1.2	3.8	4.4	3.0

Ambiances intérieures à température différente

$$T_{i, sup} = 18 + 2 \times \sin\left(\frac{2\pi t}{10^6}\right) \quad T_{i, inf} = 20 + 1 \times \sin\left(\frac{2\pi t}{10^6}\right)$$

→ Division de la structure équivalente en 2 parties, séparées par un plan adiabatique

→ Partie supérieure : 60% de la surface ($\frac{0.45}{0.45+0.3}$) → $T_{i, sup}$

→ Partie inférieure : 40% de la surface ($\frac{0.3}{0.45+0.3}$) → $T_{i, inf}$

	Ecart moyen	Ecart max	Ecart intégrale +	Ecart intégrale -
	W/m	W/m	%	%
q_{si}	0.13	0.91	1.4	4.7
q_{se}	0.93	2.2	5.2	5.1

Structure équivalente à 4 couches

Err = 0,0015

	Ecart moyen	Ecart max	Ecart intégrale +	Ecart intégrale -
	W/m	W/m	%	%
q_{si}	0.11	0.17	1.4	3.4
q_{se}	0.77	2.2	0.82	0.73

CONCLUSIONS

L'ensemble des résultats montre une bonne précision de la structure équivalente 1D, qui reproduit un comportement thermique similaire à celui de la structure 2D étudiée et plus précis que pour une prise en compte classique du détail. De plus, l'ajout d'un flux solaire ne perturbe pas la précision de la structure équivalente et un premier test avec des températures d'ambiance intérieure différentes s'est avéré concluant (à confirmer pour d'autres cas). Nous avons aussi montré que les efforts nécessaires pour déterminer une structure équivalente à 4 couches ne sont pas justifiés et qu'utiliser 3 couches est donc suffisant.

Les étapes de la méthodes sont bien définies et les premiers résultats sont donc encourageants mais plusieurs améliorations sont souhaitées : étude plus approfondie de la fonction d'erreur, une bonne réponse à des sollicitations extérieures plus réalistes (pour justifier le choix de $P=24 h$) et à des sollicitations intérieures plus sévères. De plus, la méthode devra être appliquée à un plus grand nombre de détails 2D/3D : différents types de détails, pour des structures lourdes/légères, en neuf/rénovation, avec traitement efficace ou non du pont thermique créé, etc. L'impact d'une modélisation plus précise des détails 2D/3D dans un logiciel de simulation énergétique des bâtiments est également à évaluer.