

ANNEXE

Modalités de prise en compte du système de «Radiateur numérique» dans la réglementation thermique pour les bâtiments existants

1. Définition du système

Le Radiateur numérique est un radiateur permettant de recycler la chaleur fatale informatique sous forme de chaleur utile. Il s'apparente à un radiateur électrique dans lequel l'élément chauffant à effet joule est remplacé par des processeurs informatiques, ainsi que des résistances d'appoint.

Le Radiateur numérique est piloté de façon à ajuster automatiquement la puissance dégagée en modulant les calculs réalisés par ces processeurs (et éventuellement la fréquence d'utilisation des processeurs) pour atteindre et maintenir la température ambiante souhaitée, cette dernière étant définie par l'utilisateur comme un système de chauffage traditionnel. Le Radiateur numérique peut également être mis en veille manuellement par l'occupant.

Le système est constitué des composants suivants (intégrés directement dans le radiateur) :

- Un ensemble comprenant des cartes électroniques (type cartes mères) comprenant des processeurs de calcul (type CPU ou GPU),
- Un bloc d'alimentation,
- Un routeur permettant de communiquer avec l'extérieur et envoyer les consignes du thermostat,
- Des éléments chauffants électriques d'appoint par effet joule, visant à compléter la puissance transmise au local, dans les périodes où la puissance thermique des processeurs informatiques est insuffisante,
- Un ensemble de capteurs, constituant la partie « objet connecté » du radiateur.

2. Champ d'application

Le Titre V Radiateur numérique **n'est pas applicable** pour :

- les bâtiments climatisés au sens de la RTex,
- les bâtiments constitués de locaux de grand volume, c'est-à-dire de locaux dont la hauteur sous plafond est supérieure à 6 mètres.

En dehors de cette contrainte, le Radiateur Numérique peut être déployé sur tout type de bâtiment existant parmi les typologies suivantes :

- Établissements sanitaires avec hébergement
- Logements (bâtiments d'habitation)
- Hôtellerie et autres hébergements
- Locaux où il n'est pas possible pour des raisons de conservation des objets entreposés de laisser dériver sensiblement la température
- Établissements sanitaires sans hébergement
- Enseignement
- Bureaux
- Salles de spectacle, de conférence
- Commerces
- Restauration plusieurs repas par jour
- Locaux non compris dans une autre catégorie
- Établissements sportifs
- Stockage
- Industrie

- Transport
- Restauration un repas par jour.

Le Titre V prévoit le cas de figure où une partie de la surface du bâtiment est équipée de radiateurs électriques classiques (sèche-serviettes des pièces humides par exemple) en complément des radiateurs numériques. A contrario, toute association de radiateurs numériques avec des générateurs de chauffage autres qu'électriques à effet joule est exclue du périmètre du Titre V.

Le Titre V n'est applicable que sous réserve d'un dimensionnement de la puissance de chauffage maximale cohérent avec les déperditions thermiques totales du bâtiment. Concrètement, on considère le Titre V non-applicable dès lors que la puissance de chauffage maximale, calculée à partir du nombre et des caractéristiques des radiateurs numériques (résistances électriques d'appoint comprise) et des autres chauffages électriques complémentaires, est inférieure à 80% des déperditions thermiques totales du bâtiment à la température extérieure de base calculées selon la méthode Th-CEex. Ce critère est vérifié dans l'outil d'application au format tableur dont la méthode est décrite ci-après.

3. Méthode de prise en compte dans les calculs pour la partie non directement modélisable

3.1 GÉNÉRALITÉS

La méthode de prise en compte du Radiateur numérique dans la RTex repose sur un post-traitement des résultats obtenus à l'issue d'une simulation avec le moteur de calcul de la RTex du bâtiment après rénovation, nommée la simulation de départ dans la suite du document.

Cette simulation de départ est réalisée en considérant comme système de chauffage des radiateurs électrique classiques. L'émetteur de chauffage correspondant au Radiateur numérique doit être paramétré de la façon suivante :

- **Type_emetteur_ch** : 1) Radiateur,
- **ratio_emission_ch** : part de besoin de chauffage assurée par les radiateurs numériques, selon §10.6 de la méthode Th-CEex. Le paramètre « ratio_emission_ch » est à utiliser dans le cas où le Radiateur numérique est associé à des radiateurs électriques classiques (dans les mêmes locaux et/ou dans d'autres locaux) dans le bâtiment considéré. Le ratio d'émission, aussi noté Ratem, doit être déterminé conformément au §10.6 "Systèmes d'émission composites et multiples de la méthode Th-CEex". Dans le cas où radiateurs numériques et classiques sont associés dans une même pièce, on considèrera une configuration "base et complément par temps froid" au sens de la méthode ThCE-ex.
- **classe_variation_spatiale_ch** : 2) Classe B,
- **variation_temporelle_ch** : 2) Couple régulateur-émetteur permettant un arrêt total de l'émission (correspond à une variation temporelle de +1,8°C) dans le calcul.

A l'issue de la simulation de départ, l'applicateur du Titre V doit récupérer pour le bâtiment ou zone couverte par les radiateurs numériques :

- la consommation de chauffage en énergie primaire du bâtiment ou de la zone couverte, Cep_ch, en kWhép/(an.m²SHON),
- la valeurs des déperditions totales du bâtiment ou de la zone par unité de surface, H, en W/(K.m²SHON).

Le post-traitement des résultats est ensuite réalisé via un outil au format tableur dont la sortie principale est la consommation de chauffage en énergie primaire du bâtiment corrigée pour la prise en compte du radiateur numérique, Cep_ch_corrige, en kWhép/(an.m²SHON).

Enfin, la consommation conventionnelle globale en énergie primaire du bâtiment doit être corrigée manuellement en remplaçant le Cep_ch par le Cep_ch_corrige dans les résultats de la simulation de départ soit :

$$\text{Cep_corrige} = \text{Cep}(\text{initial}) - \text{Cep_ch}(\text{initial}) + \text{Cep_ch_corrige} \quad \text{Eq (1)}$$

3.2 DESCRIPTION MATHÉMATIQUE DU POST-TRAITEMENT

Le paragraphe ci-dessous décrit en détail le contenu de l'outil au format tableur aboutissant au calcul de Cep_ch_corrige.

La méthode repose sur un calcul de rendement annuel moyen, dans la même approche que celle retenue pour les générateurs à combustion dans la méthode Th-CEex. Cette méthode se décompose en 3 étapes :

- recalcul de la valeur du paramètre PCC100 (kW), puissance de chauffage maximale obtenue à partir des déperditions totales du bâtiment ou de la zone couverte par les radiateurs numériques. PCC100 se calcule dans l'outil de post-traitement à partir de ses déperditions, de la température intérieure de consigne et de la température extérieure conventionnelle de base pour le chauffage,
- correction des fréquences de chauffage à chaque niveau de puissance en fonction du dimensionnement du générateur par rapport aux déperditions de base du bâtiment,
- calcul du rendement annuel conventionnel moyen de chauffage sur la base des fréquences d'usage associées à chacun des taux de charge du générateur, tels que définis pour les générateurs à combustion (§15.4.1 de la méthode Th-CEex).

3.2.1 PARAMÈTRES

Nom	Description	Unité
Paramètres généraux du projet		
Zone climatique	Zone climatique du projet (H1a... ; H3)	
Altitude	Classe d'altitude du projet : 0 - Inférieur ou égale à 400 m 1 - Entre 400 et 800 m 2 - Supérieure à 800 m	
Usage_zone	Usage de la zone équipée de radiateurs numériques : voir Erreur : source de la référence non trouvée	
Niveau_temperature	Niveau de températures de consigne appliqué Voir Erreur : source de la référence non trouvée	
Horaires_occupation	Typologie d'horaires d'occupation appliqué Voir Erreur : source de la référence non trouvée	
Surface_utile_habitable	Surface utile ou habitable de la zone	m ²
SHON	Surface Hors Œuvre Nette de la zone	m ²
H	Coefficient de déperditions totales de la zone	W.K ⁻¹ .m ²
Ratio_emission_ch	Ratio de surface de la zone équipé de radiateurs numériques (réel entre 0 et 1)	
Cep_ch	Consommation en énergie primaire de chauffage totale de la zone	kWh.m ⁻² .an ⁻¹
Paramètres du radiateur numérique		
N_radnum	Nombre de radiateurs numériques installés dans le bâtiment	Entier

Pw_abs_Radnum_pc	Puissance maximale absorbée par le radiateur numérique à pleine charge (ensemble des composants)	W
Pw_abs_CM_pc	Puissance maximale absorbée par les cartes mères seules	W
Pw_abs_veille	Puissance électrique absorbée du radiateur numérique en mode veille englobant routeur, capteurs et alimentation associée	W
$\eta_{\text{alimentation}}$	Efficacité du bloc d'alimentation du Radiateur Numérique	-

Tableau 1: Températures de consigne conventionnelles en chauffage

3.2.2 CALCUL DU PCC100

PCC100 est la puissance conventionnelle pour le chauffage calculée selon l'annexe C de la méthode Th-CEex du bâtiment ou de la zone desservie par les radiateurs numériques.

PCC100 s'obtient par la relation suivante :

$$PCC100 = H \times SHON \times (\theta_{iich} - \theta_{eb}) \quad \text{Eq (2)}$$

Avec :

- H déperditions totales du bâtiment équipé de radiateurs numérique en $W.K^{-1}.m^{-2}$ (SHON), disponible dans le fichier sortie.xml du calcul RTex.

- SHON : la SHON du bâtiment équipé des radiateurs numérique (m^2),

- θ_{iich} : température intérieure de consigne pour le chauffage ($^{\circ}C$)

- θ_{eb} : température extérieure conventionnelle de base pour le chauffage ($^{\circ}C$)

Les valeurs des deux derniers paramètres ci-dessus sont définies de manière conventionnelle selon les modalités prévues dans la méthode Th-CEex.

Pour le paramètre θ_{iich} , ces valeurs varient en fonction du type d'horaires d'occupation de l'usage considéré. Celles-ci sont les suivantes :

Niveau de température	Occupation	Réduction de chauffage de moins de 48h	Réduction de chauffage de plus de 48h
Élevé	21 $^{\circ}C$	18 $^{\circ}C$	7 $^{\circ}C$
Moyen	19 $^{\circ}C$	16 $^{\circ}C$	7 $^{\circ}C$
Réduit	15 $^{\circ}C$	7 $^{\circ}C$	7 $^{\circ}C$

Tableau 2: Températures de consigne conventionnelles en chauffage

Enfin, les valeurs du paramètre θ_{eb} diffèrent selon la zone climatique. Celles-ci sont les suivantes :

Zone Climatique	Température extérieure conventionnelle de base, θ_{eb} (°C)
H1a, H1b, H1c	-9
H2a, H2b, H2c, H2d	-6
H3	-3

Tableau 3: Températures conventionnelles de base en période de chauffage

3.2.3 PROFILS DE CHARGE CONVENTIONNELS

Le profil de charge conventionnel donne pour chaque intervalle de taux de charge le coefficient de pondération correspondant.

On distingue trois profils de charge conventionnels différents selon le type d'horaire d'occupation tels que définis dans le tableau suivant :

Horaires d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	16 (de 0h à 10h et de 18h à 24h)	5 (lundi au vendredi)
	24h	Samedi et dimanche
Moyens	10 (8h à 18 h)	5 (lundi au vendredi)
Courts	5 (9h à 14 h)	5 (lundi au vendredi)

Tableau 4: Scénarios d'occupation

- Profil de charge dit 'long ' qui correspond au type d'horaires d'occupation « longs ».
- Profil de charge dit 'moyen ' qui correspond au type d'horaires d'occupation « moyens ».
- Profil de charge dit 'court ' qui correspond au type d'horaires d'occupation « courts »

On rappelle que les types d'horaires d'occupation dépendent du type d'usage de la zone cf le tableau suivant :

Types d'usages	Horaires d'occupation	Niveau de température
Établissements sanitaires avec hébergement	Longs	Élevé
Logement Hôtellerie et autres hébergements Locaux où il n'est pas possible pour des raisons de conservation des objets entreposés de laisser dériver sensiblement la température	Longs	Moyen
Établissements sanitaires sans hébergement	Moyens	Élevé
Enseignement Bureau Salles de spectacles, de conférences Commerces Restauration plusieurs repas par jour Locaux non compris dans une autre catégorie	Moyens	Moyen
Établissement sportif Stockage Industrie Transport	Moyens	Réduit
Restauration un repas par jour	Courts	Moyen

Tableau 5: Horaires de maintien en température et niveaux de température

Le Tableau 3 ci-dessous décrit les 3 profils de charge conventionnels évoqués ci-dessus en fonction du type d'usage :

Type d'horaires d'occupation	Taux de charge:Tch									
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
De	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
A	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Longs	0.1	0.25	0.2	0.15	0.1	0.1	0.05	0.025	0.025	0
Moyens	0.1	0.2	0.2	0.15	0.1	0.075	0.05	0.025	0.025	0.075
Courts	0.075	0.2	0.175	0.125	0.1	0.075	0.05	0.025	0.025	0.15

Tableau 6: Coefficients de pondération (coeff_pond) en fonction du taux de charge (Tch) et du type d'horaires d'occupation

D'un point de vue des modalités de calcul, les taux de charges pris en compte sont calculés en milieu de classe, (5%; 15% ...);

Le coefficient de pondération noté **coeff_pond_x** est affecté au taux de charge noté **Tch_x** qui correspond à l'intervalle [Tch_x-5% Tch_x+5% [.

3.2.4 PRISE EN COMPTE DE LA PUISSANCE INSTALLÉE

Les coefficients de pondération évoqués ci-dessus sont valable si la puissance totale des radiateurs numérique est strictement également à la puissance PCC100. Pour prendre en compte la puissance de chauffage réellement installée, on introduit le coefficient de dimensionnement relatif noté **Cdimref**.

Le coefficient Cdimref est calculé pour l'ensemble des générateurs à combustion desservant une zone de bâtiment, un ensemble de zones de bâtiment ou un ensemble de zones de différents bâtiments.

$$Cdimref = \frac{N_{radnum} \times Pw_{|d|} Radnum_{pc}}{PCC 100 \times Ratio_c} \quad \text{Eq (3)}$$

Avec :

- **Nradnum** : nombre de radiateurs numériques installés dans le bâtiment,
- **Pw_abs_radnum_pc (kW)** : puissance thermique maximale d'un radiateur numérique.
- **PCC100 (kW)** : puissance conventionnelle pour le chauffage de la zone équipée de radiateurs numériques.
- **Ratio_emission_ch (réel entre 0 et 1)** : part de surface de la zone équipée par des radiateurs numériques. Voir §Erreur : source de la référence non trouvée.

Si C_dim_ref < 0,8, le projet est considéré comme hors champs d'application du Titre V, car le nombre de radiateurs numériques (et de radiateurs complémentaires) est insuffisant par rapport aux déperditions thermiques maximales du bâtiment au sens de la méthode Th-CEex. On affiche alors un message d'erreur à la place du Cep_ch_corrige (« Le Titre V ne s'applique pas, revoir le dimensionnement »).

Le profil de charge conventionnel décrit au paragraphe précédent est alors modifié pour la prise en compte du coefficient Cdimref. Le coefficient **coeff_pond_{x-dim}** est alors affecté au taux de charge **Tch_{x-dim}** calculé comme suit :

$$coeff_{pond_{x-dim}} = coeff_{pond_x} \quad Tch_{x-dim} = \frac{Tch_x}{Cdimref} \quad \text{Eq (4)}$$

Si C_dim_ref compris entre 0,8 et 1, les taux de charge Tch_x ne sont pas corrigés par le coefficient Cdimref, ce qui revient à fixer, pour toute valeur de x, Tch_{x-dim} = Tch_x.

Par ailleurs, le taux de charge $Tch_{95\%}$ correspondant à la plage [90% 100%] n'est pas corrigé par le coefficient C_{dimref} , afin de prendre en compte les phases de relance de chauffage, d'où : $Tch_{95\%-dim} = Tch_{95\%}$.

3.2.5 CALCUL DU RENDEMENT CONVENTIONNEL MOYEN ANNUEL POUR LE CHAUFFAGE

Pour le calcul du rendement conventionnel annuel moyen de génération pour **le chauffage**, on procède en trois étapes :

1. On calcule les puissances moyennes consommées $P_{cons,x-fonc}$ à chaque taux de charge corrigé Tch_{x-dim} .
2. On en déduit les puissances fournies et consommées moyennes, P_{mfou} et P_{mcons} , pondérées par les coeff_pond_{x-dim}.
3. On calcule enfin le rendement conventionnel annuel moyen, en introduisant une correction pour la prise en compte la consommation en mode veille au cours des période d'absence de besoin de chauffage (au cours de la saison de chauffe).

Calcul des puissances moyennes consommées à chaque taux de charge Tch_{x-dim}

Pour calculer la puissance absorbée par le radiateur numérique à un taux de charge donné, nous avons utilisé les équations de la fiche algorithme du modèle de radiateur numérique développé pour la RT2012 (disponible en annexe de ce document).

On introduit une puissance maximale fournie par le mode sans appoint, $P_{max,CMseules}^{\square}$, comprenant les cartes mères, le routeur, la puissance d'auxiliaire de veille et de l'alimentation :

$$P_{max,CMseules}^{\square} = P_{w_{|c|}veille} + \frac{1}{\eta_{alimentation}} \cdot P_{w_{|c|}CM_{pc}} \quad \text{Eq (5)}$$

Soit $P_{fou,x}$ la puissance thermique fournie au taux de charge Tch_{x-dim}

$$P_{fou,x} = N_{radnum} \times P_{w_{|c|}radnum,pc} \times Tch_{x-dim} \quad \text{Eq (6)}$$

Si $P_{fou,x} \leq W_{aux,0}$, alors : mode veille

La consommation est égale à la consommation du mode veille :

$$P_{abs,x} = P_{w_{|c|}veille} \quad \text{Eq(7)}$$

Sinon, si $P_{fou,x} \leq P_{max,CMseules}^{\square}$, alors : mode cartes mère seules

Dans ce cas, le Radiateur Numérique fonctionne sans recours à l'appoint : la puissance thermique cumulée des cartes mères et auxiliaires suffit à répondre au besoin de chauffage.

La puissance fournie spécifiquement par les cartes mères, hors auxiliaires, PCM,x est calculée à partir de $P_{fou,x}$ et des autres contributions apportées par les auxiliaires (veille, alimentation, routeur) :

$$PCM,x = \text{MIN} \left(P_{w_{|c|}CM_{pc}} ; \eta_{alimentation} \cdot (P_{fou,x} - P_{w_{|c|}veille}) \right) \quad \text{Eq (8)}$$

La consommation associée à l'alimentation des cartes mère, notée $W_{alimentation,x}$ est calculée à partir de l'efficacité de l'alimentation $\eta_{alimentation}$, en déduisant la consommation équivalente à celle de l'alimentation de référence $\eta_{alimentation_ref}$, fixée à 0,95 :

$$W_{alimentation,x} = \text{MAX} \left(0 ; \frac{1}{\eta_{alimentation}} - \frac{1}{\eta_{alimentation_ref}} \right) \cdot PCM,x \quad \text{Eq (9)}$$

Sinon ($P_{fou,x} > P_{max,CMseules}^{\square}$) : mode cartes mère et résistances électriques d'appoint

Dans ce dernier cas, les cartes mères fonctionnent à pleine charge, à la puissance absorbée $Pw_{abs_CM_pc}$, et l'appoint est sollicité.

Ainsi :

$$PCM, x = Pw_{iç} CM_{pc} \tag{Eq (10)}$$

$W_{alimentation,x}$ est calculé selon l'équation

Enfin, on comptabilise la consommation de l'appoint, correspondant à la quantité de chaleur fournie au-delà de la quantité fournie par les cartes mères et les auxiliaires $P_{max,CMseules}$:

Au final, on additionne les consommations des différents composants du Radiateur Numérique pour obtenir sa puissance consommée $Pabs,x$. On ajoute à cette somme un terme proportionnel à PCM,x pour intégrer le risque d'absence de calcul disponible (coupure internet de plus de quelques heures). Pour cela, un taux $\beta_{coupure}$ forfaitaire de 0,1% est introduit :

$$Pabs, x = Pw_{iç_{veille}} + W_{alimentation,x} + W_{appoint,x} + \beta_{coupure} . PCM, x \tag{Eq (11)}$$

Calcul des puissances fournies et consommées moyennes, Pmfou et Pmcons, pondérées par les coeff pondx-dim :

Pour chaque taux de charge Tch_{x_final} au point de fonctionnement x :

- on calcule dans un premier temps les puissances fournies et consommées $Pcons_{x-fonc}$ au point de fonctionnement x, pondérée par le coefficient coeffpon :

$$P_{fou, x-fonc} = P_{fou, x} \times coeffpon_{x,dim} \tag{Eq (12)}$$

$$P_{abs, x-fonc} = P_{abs, x} \times coeffpon_{x,dim} \tag{Eq (13)}$$

Après avoir calculé les puissances moyennes fournies et consommées au point de fonctionnement x, on calcule les puissances **moyennes** fournies $Pmfou$ et consommées $Pmcons$

$$Pmfou = \sum_{x=0\%}^{x=100\%} P_{fou_{x-fonc}} \tag{Eq (14)}$$

$$Pmcons = \sum_{x=0\%}^{x=100\%} P_{cons_{x-fonc}} \tag{Eq (15)}$$

Calcul du rendement conventionnel annuel moyen de chauffage et correction pour la prise en compte la consommation en mode veille

Le rendement de chauffage conventionnel annuel moyen est calculé comme suit :

$$Rconv_{chauff} = \frac{Pmfou}{Pmcons + Tauxveil \times Pveil} \tag{Eq (16)}$$

On considère la consommation du mode veille de puissance $Pveil$ pendant un temps de fonctionnement qu'on exprime par un ratio $Tauxveil$. $Tauxveil$ est le ratio de temps de mode veille au temps de fourniture de chaleur. On le considèrera égal au ratio de temps de fonctionnement de veilleuse des chaudières au temps de fourniture de chaleur, tel que défini dans la méthode Th-CEex §15.4.1.2.9 (tableau 66). Ce coefficient $Tauxveil$ vaut 1 quels que soient les cas.

3.2.6 CALCUL DE LA CONSOMMATION DE CHAUFFAGE CORRIGÉE POUR LA PRISE EN COMPTE DU RADIATEUR NUMÉRIQUE

Pour finir, on définit le coefficient de correction de la consommation de chauffage, α_{ch} , par la relation suivante :

$$\alpha_{ch} = \frac{1}{R_{conv_{chauff}}} \quad \text{Eq (17)}$$

Et la consommation de chauffage en énergie primaire est corrigée comme suit pour prendre en compte les radiateurs numériques :

$$Cep_i = Cep_{ch} \times \left(Ratio_i \times \alpha_{ch} + (1 - Ratio_i) \right) \quad \text{Eq (18)}$$