



Jean-Baptiste Bouvenot  
& Bernard Flament

# Génie climatique et énergétique

Régulation des systèmes  
de chauffage, de ventilation  
et de climatisation

Théorie et problèmes  
d'application résolus

# Jean-Baptiste Bouvenot & Bernard Flament

## Génie climatique et énergétique : régulation appliquée CVC & QAI

Théorie et problèmes d'application résolus

Le génie climatique et énergétique définit l'ensemble des connaissances et des techniques concernant la conception, la mise en œuvre et les applications portant sur le chauffage, la ventilation, la climatisation (CVC) mais également l'énergétique du bâtiment, la qualité de l'air intérieur (QAI) et l'efficacité énergétique.

Les professionnels de ce secteur du bâtiment et de l'industrie s'efforcent de **concevoir** et de **réaliser** des **systèmes climatiques** économes en énergie et à faible impact environnemental ; ils en pilotent la **gestion** et la **maintenance**. Tout en limitant l'impact environnemental, on peut ainsi maîtriser un climat artificiel dans différents types de bâtiments, qu'ils soient à usage d'habitation, tertiaires ou industriels. Dans l'optique de la transition énergétique, cette démarche doit allier sobriété, efficacité énergétique et valorisation des énergies renouvelables.

Notion centrale du génie climatique et énergétique, la **régulation appliquée des systèmes** permet de maintenir des conditions d'ambiance hygrothermiques en fonction de l'usage (confort, *process*) et d'optimiser la consommation d'énergie. Une fois le **dimensionnement** d'un système effectué, c'est la régulation qui viendra le piloter pour que son **fonctionnement** (ouverture de vanne, vitesse de pompe, vitesse de ventilateur, ouverture de volet,...) soit adapté aux **besoins** (consignes) comme aux **perturbations** (conditions climatiques extérieures, occupation,...).

Traitant principalement d'**applications en CVC et en QAI**, les auteurs veulent faciliter la compréhension des **phénomènes physiques** et des **principes fondamentaux de la régulation** de ces systèmes. Destiné aux futurs professionnels de l'industrie et de la construction – étudiants des deux premiers cycles et élèves en écoles d'ingénieurs – **ce manuel illustre l'ensemble des connaissances théoriques par des cas d'études** issus de l'enseignement délivré à l'INSA de Strasbourg.

**SOMMAIRE** : Introduction • Nomenclature • **Formulaire et bases théoriques** • 1. Les boucles de régulation • 2. Loi d'eau • 3. Rappels sur les échangeurs de chaleur • 4. Comportement des échangeurs dans une boucle de régulation • 5. Étude des vannes de réglage • 6. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs • 7. Pertes de charge • 8. Modèles de comportement des systèmes • 9. Méthodes d'identification des modèles de comportement • 10. Les régulateurs • 11. Schémas de régulation en génie climatique • **Problèmes résolus** • 1. Réglage de puissance des échangeurs • 2. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs • 3. Modèles de comportement • 4. Identification des modèles de comportement • 5. Régulateurs PID • 6. Schémas de régulation • Bibliographie

Ancien élève de l'ENS Cachan, agrégé de génie civil option équipements et énergie, docteur en énergétique du bâtiment et des systèmes, **Jean-Baptiste Bouvenot** – ingénieur en génie climatique et énergétique – est maître de conférences à l'INSA de Strasbourg.

Ancien élève de l'ENS Cachan, agrégé de génie civil, docteur en énergétique de l'École de Mines de Paris, **Bernard Flament** qui fut enseignant chercheur à l'université de Cergy-Pontoise est maître de conférences à l'INSA de Strasbourg où il est actuellement responsable de la spécialité génie climatique et énergétique.

### Publics

Élèves préparant le BTS  
Étudiants des IUT et des écoles d'ingénieurs  
Professionnels en activité

[www.editions-eyrolles.com](http://www.editions-eyrolles.com)  
**Éditions Eyrolles** | Diffusion Geodif

Photo de couverture © David Merle  
Création Studio Eyrolles © Éditions Eyrolles

Code éditeur : 667801  
ISBN : 978-2-212-69801-7

Génie climatique et énergétique :  
régulation appliquée

**Chez le même éditeur**

Alain Triboix & Jean-Baptiste Bouvenot, *Les transferts thermiques par l'exemple. Conduction, convection, rayonnement, échangeurs de chaleur, méthodes numériques, avec 71 problèmes d'application résolus*, 496 pages, 2015

Jean-Baptiste Bouvenot  
Bernard Flament

# Génie climatique et énergétique : régulation appliquée

ÉDITIONS EYROLLES  
61, bd Saint-Germain  
75240 Paris Cedex 05  
[www.editions-eyrolles.com](http://www.editions-eyrolles.com)

Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie doit être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) – 20, rue des Grands-Augustins – 75006 Paris.

© Éditions Eyrolles, 2019  
ISBN : 978-2-212-67801-7

# Table des matières

Préambule .....	1
Nomenclature.....	3

## PARTIE 1

### Formulaire et bases théoriques

<b>CHAPITRE 1. Les boucles de régulation.....</b>	<b>11</b>
1.1 Boucle de régulation fermée.....	12
1.2 Boucle de régulation ouverte.....	13
<b>CHAPITRE 2. Loi d'eau.....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 3. Rappels sur les échangeurs de chaleur .....</b>	<b>23</b>
3.1 Hypothèses et définitions.....	24
3.2 Méthode du DTLM .....	25
3.3 Méthode du NUT.....	26

<b>CHAPITRE 4. Comportement des échangeurs dans une boucle de régulation</b> .....	27
4.1 Réglage de puissance thermique d'un échangeur .....	27
4.2 Réglage de puissance thermique par variation de débit .....	28
4.2.1 Échangeur à co-courant .....	28
4.2.2 Échangeur à contre-courant .....	30
4.2.3 Réglage de puissance thermique d'une batterie par variation de débit ..	32
4.3 Réglage de puissance thermique par variation de température .....	34
4.4 Applications aux échangeurs de chaleur en génie climatique .....	36
4.4.1 Émetteurs de chaleur pour le chauffage .....	36
4.4.2 Échangeurs de chaleur en refroidissement/climatisation .....	38
<b>CHAPITRE 5. Étude des vannes de réglage</b> .....	39
5.1 Définitions et caractéristiques de vannes de régulation .....	40
5.1.1 Débits normalisés $K_v$ et $K_{vs}$ .....	40
5.1.2 Caractéristiques d'une vanne de réglage .....	41
5.1.3 L'autorité .....	42
5.1.4 Les vannes indépendantes de la pression différentielle .....	46
5.2 Étude des vannes trois voies .....	47
5.2.1 Technologies .....	48
5.2.2 Montages hydrauliques .....	49
5.2.3 Règles de dimensionnement .....	51
<b>CHAPITRE 6. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs</b> .....	53
6.1 Les variateurs électroniques de vitesse (VEV) .....	53
6.2 Régulation d'émetteurs par pompes équipées de VEV .....	54
6.2.1 Principe .....	54
6.2.2 Stratégies de régulation de puissance thermique à variation de vitesse ..	58
6.2.3 Notion de surface de pompe/courbes de pompes artificielles .....	61
6.2.4 Choix du type de régulation .....	62
<b>CHAPITRE 7. Pertes de charge</b> .....	63



<b>CHAPITRE 8. Modèles de comportement des systèmes.....</b>	<b>65</b>
8.1 Modélisation adaptée à la conception d'un système de régulation.....	65
8.2 Modèles de comportement.....	66
8.2.1 Forme générale d'un modèle de comportement.....	66
8.2.2 Transformées de Laplace.....	66
8.2.3 Fonctions de transfert.....	69
8.2.4 Schéma bloc.....	69
8.3 Réponse temporelle d'un système .....	70
8.3.1 Réponse temporelle à des entrées apériodiques .....	70
8.3.2 Paramètres caractéristiques d'une réponse indicielle.....	73
8.4 Modèles de comportement : systèmes bouclés.....	75
 <b>CHAPITRE 9. Méthodes d'identification des modèles de comportement.....</b>	 <b>77</b>
9.1 Objectif de l'identification.....	77
9.2 Méthodes graphiques .....	77
9.2.1 Systèmes apériodiques avec retard en boucle ouverte (BO) .....	77
9.2.2 Identification en boucle fermée (BF) .....	80
9.3 Comportement dynamique des équipements climatiques .....	81
 <b>CHAPITRE 10. Les régulateurs.....</b>	 <b>83</b>
10.1 Rôle d'un régulateur.....	83
10.2 Équation générale d'une boucle de régulation.....	84
10.3 Les régulateurs PID.....	84
10.3.1 Action proportionnelle P.....	85
10.3.2 Action intégrale I.....	87
10.3.3 Action dérivée D .....	90
10.3.4 Actions combinées PID.....	91
10.3.5 Bilan .....	92
10.3.6 Les architectures de PID.....	92
10.4 Méthodes de paramétrage des régulateurs PID .....	93
10.4.1 Méthodes basées sur la réponse à un échelon .....	93
10.4.2 Méthodes de réglages « terrain » .....	96
10.4.3 Méthodes auto-adaptatives .....	97

<b>10.5</b>	<b>Régulateurs non progressifs</b> .....	98
10.5.1	Régulateurs TOR .....	98
10.5.2	Régulateurs à positions multiples.....	99
10.5.3	Régulateurs TOR modulés .....	99
<b>10.6</b>	<b>Les boucles de régulation en cascade</b> .....	100
<b>10.7</b>	<b>Bilan sur les régulateurs</b> .....	101
 <b>CHAPITRE 11. Schémas de régulation en génie climatique</b> .....		103
<b>11.1</b>	<b>Fonctions élémentaires</b> .....	103
<b>11.2</b>	<b>Régulateurs</b> .....	104
<b>11.3</b>	<b>Compensateurs</b> .....	104
<b>11.4</b>	<b>Limiteurs</b> .....	106
<b>11.5</b>	<b>Sélecteur</b> .....	107
<b>11.6</b>	<b>Séquenceur</b> .....	109
<b>11.7</b>	<b>Organes de sécurité</b> .....	110
11.7.1	Sécurité antigel.....	110
11.7.2	Pressostat différentiel.....	111
11.7.3	Sécurité antigel des récupérateurs de chaleur.....	112
<b>11.8</b>	<b>Autres concepts</b> .....	113
11.8.1	<i>Change over</i> .....	113
11.8.2	<i>Free cooling</i> .....	114
<b>11.9</b>	<b>Schémathèque</b> .....	114
11.9.1	Régulation d'une installation de chauffage en boucle ouverte .....	114
11.9.2	Régulation d'une installation de chauffage en boucle fermée par vannes thermostatiques (VT) .....	115
11.9.3	Régulation d'une installation de chauffage collectif en boucle fermée par vannes thermostatiques .....	116
11.9.4	Régulation d'un plancher chauffant/rafraîchissant en boucle ouverte avec sécurité anticondensation.....	117
11.9.5	Régulation d'une chaufferie à chaudières modulantes sur la température de départ.....	118
11.9.6	Régulation d'une chaufferie à chaudières modulantes sur la température de retour .....	119
11.9.7	Régulation d'une CTA en boucle ouverte (mode ventilation et chauffage) .....	120

11.9.8	Régulation d'une CTA en boucle fermée (mode ventilation, chauffage et refroidissement).....	121
11.9.9	Régulation d'une CTA avec recyclage en boucle fermée (mode ventilation, chauffage, refroidissement et <i>free cooling</i> ) .....	121
11.9.10	Régulation d'une CTA en boucle fermée (mode chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification) .....	123
11.9.11	Régulation d'une CTA d'une piscine en boucle fermée.....	124
11.9.12	Régulation en cascade d'une CTA en boucle fermée.....	125
11.9.13	Régulation en cascade d'une CTA en boucle fermée + régulation de la qualité de l'air par sondes CO <sub>2</sub> et VEV (sans <i>free cooling</i> ) .....	126
11.9.14	Régulation en cascade d'une CTA en boucle fermée + régulation de la qualité de l'air par sondes CO <sub>2</sub> et registres d'air conjugués (avec <i>free cooling</i> ) .....	127
11.9.15	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'une roue enthalpique.....	128
11.9.16	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'un échangeur à plaques et d'un by-pass .....	129
11.9.17	Régulation d'une CTA équipée d'un récupérateur de chaleur à plaques, d'un by-pass et d'une batterie de préchauffage.....	130
11.9.18	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'un caloduc et d'un by-pass .....	131
11.9.19	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'un récupérateur de chaleur à batteries à eau glycolée.....	132

## PARTIE 2

# Problèmes

<b>Problèmes 1.</b>	<b>Réglage de puissance des échangeurs.....</b>	<b>135</b>
1.1	Loi d'eau.....	135
1.2	Caractéristique idéale de vanne .....	138
1.3	Caractéristique d'un échangeur à co-courant .....	142
1.4	Caractéristique d'un échangeur à contre-courant .....	147
1.5	Réglage de puissance d'un échangeur par vanne trois voies.....	152
1.6	Réglage de puissance d'un plancher chauffant .....	156
1.7	Étude partielle du réglage de puissance d'une sous-station de réseau urbain .....	159
1.8	Réglage de puissance d'un ventilo-convecteur.....	163

1.9	Réglage de puissance d'un système de chauffage raccordé à un système solaire combiné (SSC) .....	165
1.10	Étude du réglage de puissance d'une tour de refroidissement .....	169
1.11	Étude du réglage de puissance d'une batterie froide par vanne deux voies .....	172
1.12	Sous-station d'un réseau de chaleur urbain.....	178

**Problèmes 2. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs..... 185**

2.1	Réglage de puissance d'un émetteur par variation de vitesse de pompe .....	185
2.2	Réglage de puissance d'une batterie froide de CTA par variation de vitesse .....	192
2.3	Régulation de la qualité de l'air par variation de vitesse de ventilateurs (1/2) .....	199
2.4	Régulation de la qualité de l'air par variation de vitesse de ventilateurs (2/2) .....	204
2.5	Qualité de régulation d'un émetteur de chaleur et variation de vitesse de pompe .....	210

**Problèmes 3. Modèles de comportement..... 225**

3.1	Régulation de la température d'ECS.....	225
3.2	Étude analytique de la réponse en température d'un petit pavillon à un échelon de flux de chauffage.....	228
3.3	Étude d'un système de chauffage mixte par plancher chauffant et radiateur.....	240
3.4	Régulation de chauffage par radiateur .....	246

**Problèmes 4. Identification des modèles de comportement .... 251**

4.1	Identification d'un modèle de comportement d'une batterie chaude..	251
4.2	Identification graphique et choix d'un régulateur .....	252

<b>Problèmes 5. Régulateurs PID</b> .....	257
5.1 Régulation de la température d'eau en sortie de chaudière .....	257
5.2 Règle de paramétrage d'un PID .....	261
5.3 Régulation de la température d'eau d'un plancher chauffant.....	264
5.4 Régulation de la température d'eau chaude sanitaire.....	266
5.5 Choix et réglage d'un mode de régulation .....	270
5.6 Réponses d'un régulateur à un transfert perturbateur .....	271
5.7 Étude de l'action D seule.....	279
5.8 Étude d'une boucle de régulation.....	281
5.9 Boucle de régulation sur CO <sub>2</sub> .....	284
<b>Problèmes 6. Schémas de régulation</b> .....	291
6.1 Schéma de régulation d'une installation climatique d'un <i>data center</i> .....	291
6.2 Schéma de régulation d'une installation climatique en zone industrielle .....	295
6.3 Schéma de régulation d'une installation climatique tertiaire.....	301
6.4 Schéma de régulation d'un centre commercial.....	307
6.5 Schéma de régulation d'un centre universitaire .....	312
<b>Bibliographie</b> .....	319



# Préambule

Ce livre est un recueil d'exercices et de problèmes corrigés sur la thématique de la régulation des systèmes énergétiques. Il s'agit pour la plupart d'applications sur des installations de chauffage, de climatisation ou de ventilation qui peuvent être rencontrées par un ingénieur climaticien. Ce recueil est donc destiné aux étudiants en études supérieures (BTS, DUT, écoles d'ingénieurs) dans le domaine de l'énergétique (froid, chauffage, génie climatique, génie énergétique) mais également aux ingénieurs en activité. Cet ouvrage n'est pas un livre de cours et suppose donc une culture minimum préalable dans le domaine, même si un formulaire et des rappels sont proposés pour la bonne compréhension des corrections. Des références bibliographiques sont données à la fin de l'ouvrage.





## Partie I

# Formulaire et bases théoriques



## CHAPITRE 1

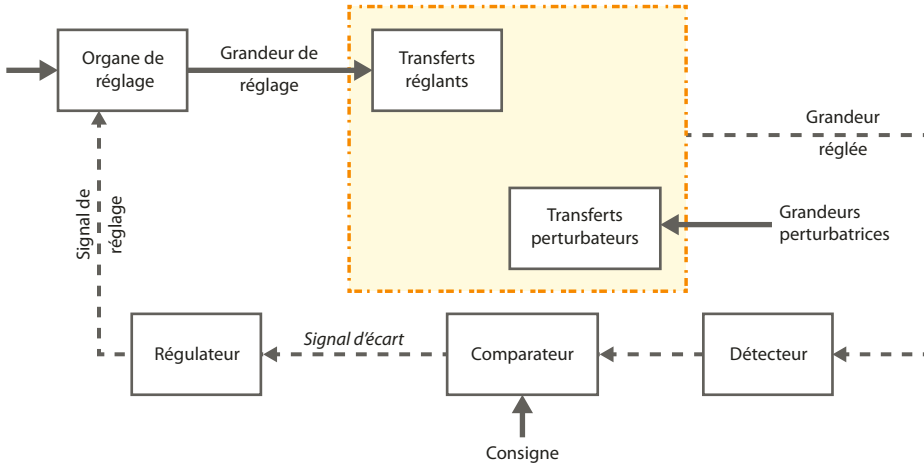
---

# Les boucles de régulation

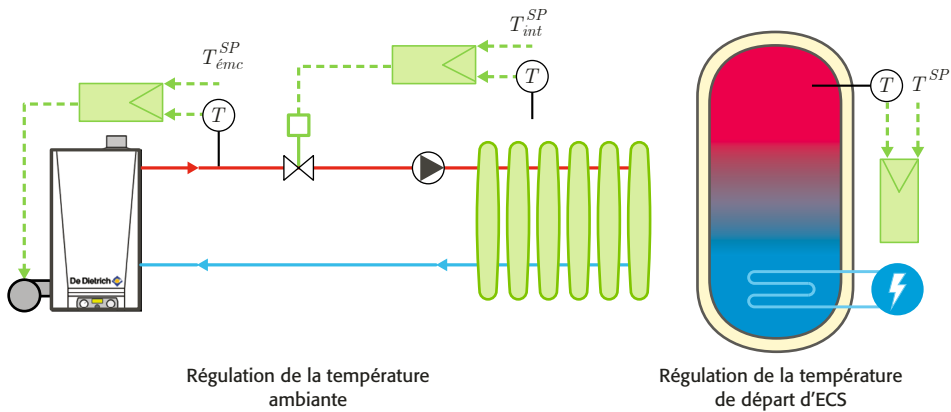
Il existe deux principes de base pour réaliser une boucle de régulation : les boucles fermées et les boucles ouvertes.

# 1.1 Boucle de régulation fermée

La boucle fermée consiste à mesurer la grandeur réglée (la température ambiante par exemple) et à agir sur le transfert réglant (le flux de chauffage par exemple) pour conserver la grandeur à la consigne. Cette régulation est dite en boucle fermée. Elle tient naturellement compte des effets des perturbations sur la grandeur réglée (les conditions météorologiques et les apports internes).



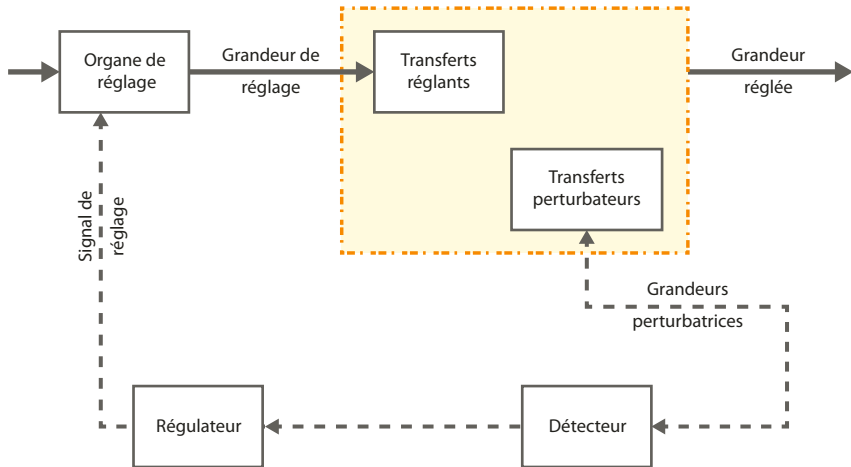
## Exemples



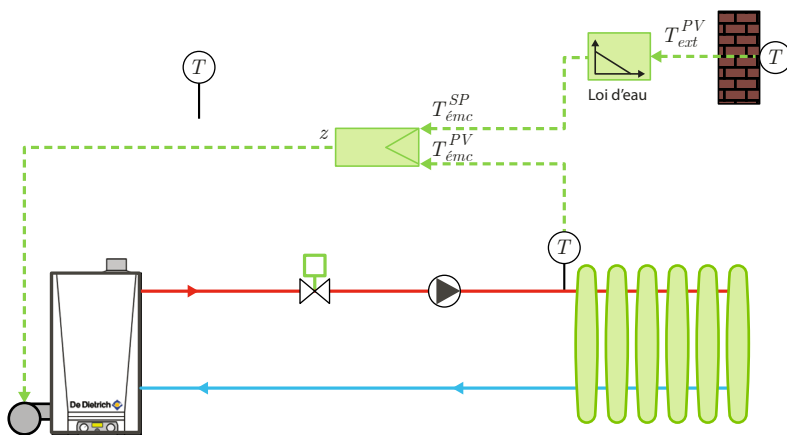
## 1.2 Boucle de régulation ouverte

La boucle ouverte consiste à mesurer la ou les perturbations et à agir sur une grandeur de réglage en fonction d'elles. La grandeur réglée n'y est pas mesurée mais la perturbation l'est. Le transfert réglant (flux de chauffage par exemple) est calculé en conséquence selon un modèle qui caractérise l'influence de la perturbation sur la grandeur réglée (une loi d'eau par exemple).

Ce principe est couramment utilisé en chauffage pour la régulation globale du chauffage d'un bâtiment ou d'une de ses zones. La puissance de chauffage est réglée en fonction de la température extérieure au moins.



### Exemple



Régulation centrale en fonction de la température extérieure



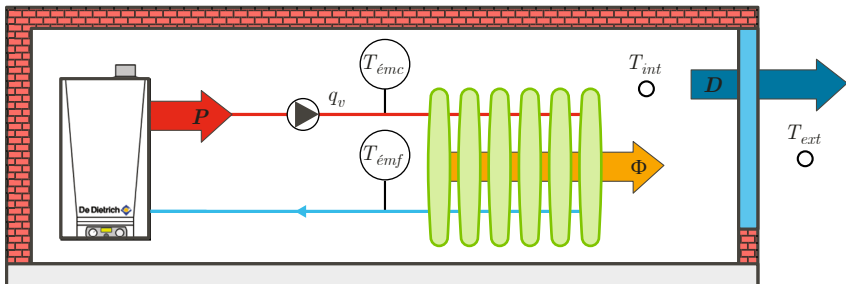
## CHAPITRE 2

# Loi d'eau

La loi d'eau est une stratégie de régulation consistant à ajuster la température d'un fluide caloporteur dans un réseau (eau de chauffage le plus souvent) en fonction de la rigueur climatique (température extérieure). Ce type de régulation en boucle ouverte permet de réaliser une régulation de base.

En supposant un comportement thermique quasi statique, la puissance de chauffage  $\Phi$  d'un bâtiment va correspondre aux déperditions thermiques qui dépendent du bâti (coefficient d'échange global  $US_{\text{bât}}$ ) et de la différence de température intérieure/extérieure  $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$ . Cette puissance de chauffage s'exprime également d'un point de vue de l'émetteur grâce à l'équation classique de transport (régime de température  $T_{\text{émc}}/T_{\text{émf}}$ ) et grâce à son coefficient d'échange  $US_{\text{ém}}$ , son exposant  $n$  et sa température moyenne logarithmique  $\Delta T_{LM}$  tels que (cf. chapitre 3) :

$$\begin{aligned}\Phi &= D = P = US_{\text{bât}} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) = \rho c_p q_v (T_{\text{émc}} - T_{\text{émf}}) \\ &= US_{\text{ém}} \Delta T_{LM}^n \approx US_{\text{ém}} \left( \frac{T_{\text{émc}} + T_{\text{émf}}}{2} - T_{\text{int}} \right)^n\end{aligned}$$



Si  $n = 1$  (émetteur linéaire tel qu'un plancher chauffant) :

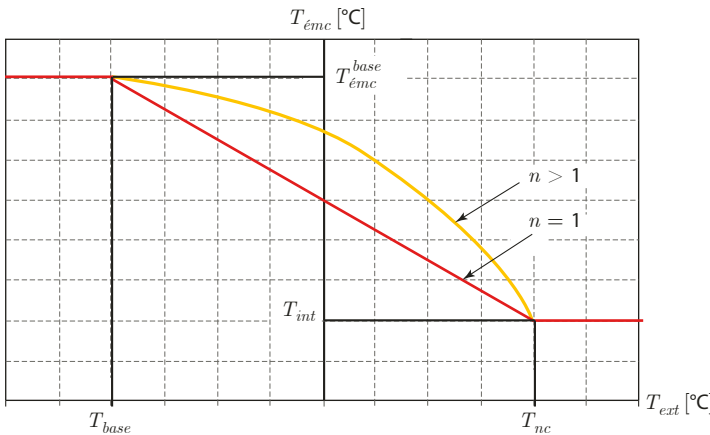
$$T_{\acute{e}mf} = \frac{US_{\acute{e}m} T_{int} + T_{\acute{e}mc} \left( \rho c_p q_v - \frac{US_{\acute{e}m}}{2} \right)}{\frac{US_{\acute{e}m}}{2} + \rho c_p q_v}$$

$$\rightarrow T_{\acute{e}mc} = \frac{US_{\acute{b}\acute{a}t}}{\rho c_p q_v} (T_{int} - T_{ext}) + \frac{US_{\acute{e}m} T_{int} + T_{\acute{e}mc} \left( \rho c_p q_v - \frac{US_{\acute{e}m}}{2} \right)}{\frac{US_{\acute{e}m}}{2} + \rho c_p q_v}$$

Au final :

$$T_{\acute{e}mc} = a T_{ext} + (1 - a) T_{int} \quad \text{avec} \quad a = - \frac{\frac{US_{\acute{b}\acute{a}t}}{\rho c_p q_v}}{\frac{2US_{\acute{e}m}}{2\rho c_p q_v} + US_{\acute{e}m}} = \frac{T_{\acute{e}mc}^{base} - T_{int}}{T_{base} - T_{nc}}$$

On donne sur la figure suivante l'allure des lois d'eau conventionnelles.



⚠ La température  $T_{ext}$  utilisée correspond en pratique à la température moyenne glissante sur les dernières vingt-quatre heures.

1. La température de base  $T_{base}$  correspond à la **température de dimensionnement** pour le chauffage (ou la climatisation) définie dans la RT2012. Par exemple, pour Strasbourg en zone H1b, la température de base est de - 15 °C.
2. La température  $T_{nc}$  correspond à la température de non chauffage. En pratique, elle est fixée à **18 °C**, en considérant que les apports gratuits (principalement internes et solaires) contribuent à chauffer l'ambiance de 2 °C en moyenne. C'est cette base qui est notamment utilisée pour les **DJU** (U = unifié et correspond à une température de calcul de 18 °C). Pour les logements récents de type BBC, ces mêmes apports gratuits contribuent à chauffer davantage une ambiance de 3 à 6 °C en pratique. La température de non-chauffage correspondrait alors à 17, voire 14 °C.



3. La température  $T_{\dot{e}mc}^{base}$  correspond au régime de température choisi en lien avec le type d'émetteur choisi. Par exemple, si on choisit un radiateur haute température, le régime de température de dimensionnement pourra être  $T_{\dot{e}mc}^{base} / T_{\dot{e}mf}^{base} = 80 / 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pour un plancher chauffant offrant une plus grande surface d'échange, le régime pourra être :  $T_{\dot{e}mc}^{base} / T_{\dot{e}mf}^{base} = 40 / 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .
4.  $T_{int}$  est la température ambiante de consigne fixée en général entre 19 et 21  $^\circ\text{C}$  sur toute la saison de chauffe.

**⚠** La loi d'eau peut également se calculer sur la température de retour  $T_{\dot{e}mf}$  :

$$T_{\dot{e}mc} = \frac{T_{\dot{e}mf} \left( \rho c_p q_v + \frac{US_{\dot{e}m}}{2} \right) - US_{\dot{e}m} T_{int}}{\rho c_p q_v - \frac{US_{\dot{e}m}}{2}}$$

$$\rightarrow T_{\dot{e}mf} = \frac{T_{\dot{e}mf} \left( \rho c_p q_v + \frac{US_{\dot{e}m}}{2} \right) - US_{\dot{e}m} T_{int}}{\rho c_p q_v - \frac{US_{\dot{e}m}}{2}} - \frac{US_{bât}}{\rho c_p q_v} (T_{int} - T_{ext})$$

Au final :

$$T_{\dot{e}mf} = b T_{ext} + (1 - b) T_{int} \quad \text{avec} \quad b = - \frac{\frac{US_{bât}}{\rho c_p q_v}}{\frac{2US_{\dot{e}m}}{2\rho c_p q_v} - US_{\dot{e}m}} = \frac{T_{\dot{e}mf}^{base} - T_{int}}{T_{base} - T_{nc}}$$

Sans simplifications, on obtient exactement, par exemple, pour deux types d'émetteurs (cf. exercice I.1) :

**Exemple de loi d'eau sur le départ ( $T_{\dot{e}mc}$ ) et sur le retour ( $T_{\dot{e}mf}$ ) pour un plancher chauffant**

