



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
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

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

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

CHAPITRE 4. Comportement des échangeurs dans une boucle de régulation	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
CHAPITRE 5. Étude des vannes de réglage	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
CHAPITRE 6. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs	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
CHAPITRE 7. Pertes de charge	63

CHAPITRE 8. Modèles de comportement des systèmes.....	65
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
 CHAPITRE 9. Méthodes d'identification des modèles de comportement.....	 77
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
 CHAPITRE 10. Les régulateurs.....	 83
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

10.5	Régulateurs non progressifs	98
10.5.1	Régulateurs TOR	98
10.5.2	Régulateurs à positions multiples.....	99
10.5.3	Régulateurs TOR modulés	99
10.6	Les boucles de régulation en cascade	100
10.7	Bilan sur les régulateurs	101
 CHAPITRE 11. Schémas de régulation en génie climatique		103
11.1	Fonctions élémentaires	103
11.2	Régulateurs	104
11.3	Compensateurs	104
11.4	Limiteurs	106
11.5	Sélecteur	107
11.6	Séquenceur	109
11.7	Organes de sécurité	110
11.7.1	Sécurité antigel.....	110
11.7.2	Pressostat différentiel.....	111
11.7.3	Sécurité antigel des récupérateurs de chaleur.....	112
11.8	Autres concepts	113
11.8.1	<i>Change over</i>	113
11.8.2	<i>Free cooling</i>	114
11.9	Schémathèque	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 ₂ 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 ₂ 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

Problèmes 1.	Réglage de puissance des échangeurs.....	135
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

Problèmes 5. Régulateurs PID	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 ₂	284
Problèmes 6. Schémas de régulation	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
Bibliographie	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

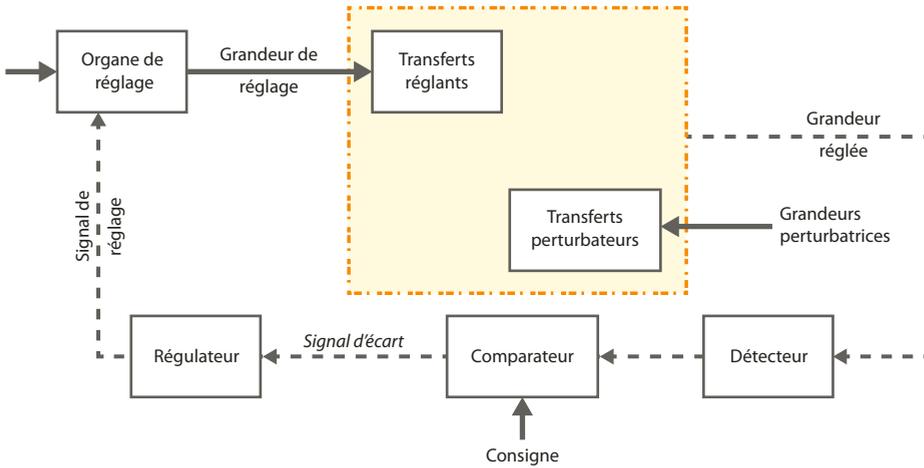
CHAPITRE 1

Les boucles de régulation

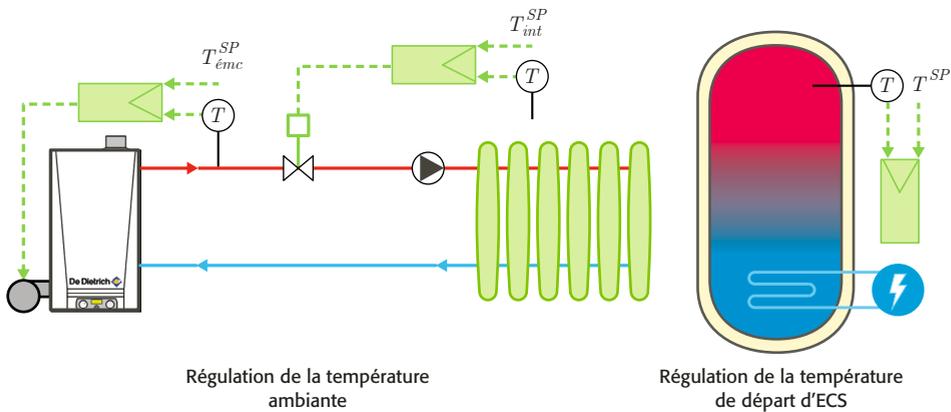
Il existe deux principes de base pour réaliser une boucle de régulation : les boucles fermées et les boucles ouvertes.

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).



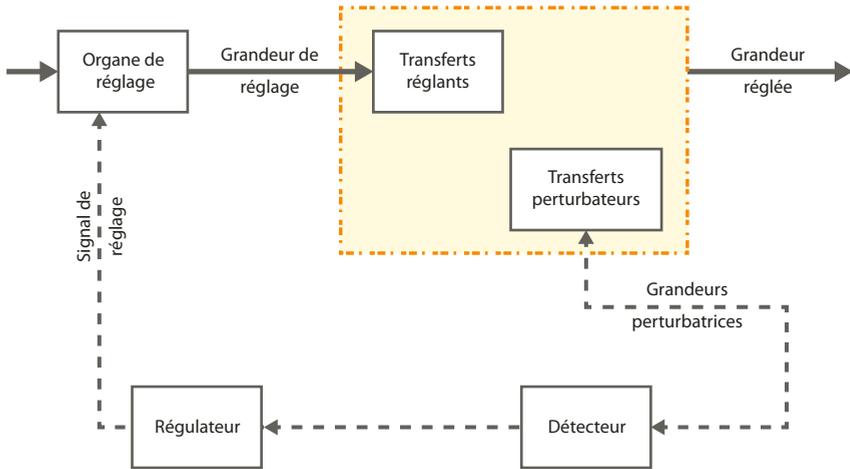
Exemples



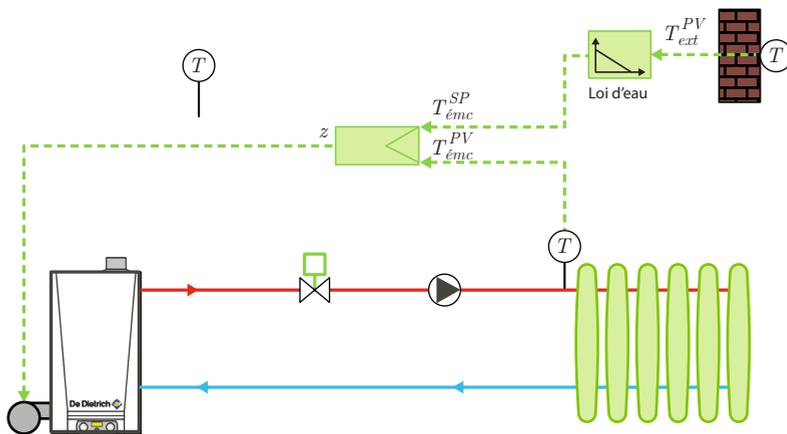
1.2 Boucle de régulation ouverte

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

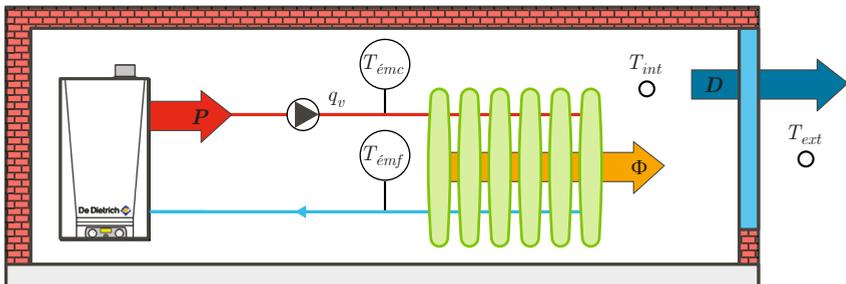
CHAPITRE 2

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 Φ 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 ΔT_{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) :

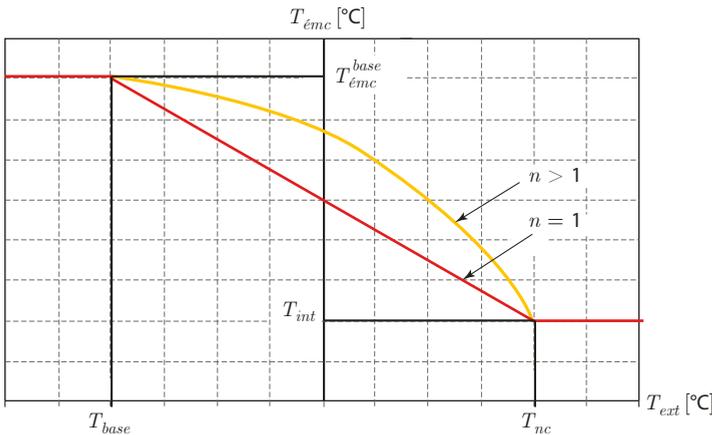
$$T_{\acute{e}mf} = \frac{US_{\acute{e}m} T_{int} + T_{\acute{e}mc} \left(\rho c_p q_v - \frac{US_{\acute{e}m}}{2} \right)}{\frac{US_{\acute{e}m}}{2} + \rho c_p q_v}$$

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

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.

- 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 $T_{\dot{e}mc}^{base} / T_{\dot{e}mf}^{base} = 80 / 60 \text{ °C}$. Pour un plancher chauffant offrant une plus grande surface d'échange, le régime pourra être : $T_{\dot{e}mc}^{base} / T_{\dot{e}mf}^{base} = 40 / 35 \text{ °C}$.
- T_{int} est la température ambiante de consigne fixée en général entre 19 et 21 °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

