

**Mesure de l'humidité de l'air —  
Enceintes climatiques et thermostatiques —  
Caractérisation et vérification**

E : Measurement of air moisture — Climatic and thermostatic chambers —  
Characterisation and verification

D : Luftfeuchtemessung — Klima- und Thermostatikammer —  
Kennzeichnung und Kontrolle

---

***Fascicule de documentation***

publié par AFNOR.

Remplace la norme homologuée NF X 15-140, d'octobre 2002.

---

***Correspondance***

À la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux de normalisation internationaux ou européens traitant du même sujet.

---

***Résumé***

Le présent document définit et précise les critères de caractérisation d'une enceinte climatique ou thermostatique, ainsi que la méthodologie et les moyens à mettre en œuvre. Cette caractérisation a pour but de connaître et de s'assurer périodiquement des performances réelles d'une enceinte.

---

***Descripteurs***

**Thésaurus International Technique** : enceinte, essai climatique artificiel, environnement, air, température, humidité, vitesse, définition, instrument de mesurage, capteur, emplacement, hygromètre, psychromètre, mesurage, homogénéité, stabilité, incertitude, contrôle métrologique, vérification, acceptabilité.

---

***Modifications***

Par rapport au document remplacé, mise à jour des références.

---

***Corrections***

---



---

## Le fascicule de documentation

---

**Le fascicule de documentation**, se différencie des normes et normes expérimentales par son caractère essentiellement informatif. Il est **élaboré par consensus** au sein d'un organisme de normalisation.

Le fascicule de documentation fait l'objet d'un examen régulier pour évaluer sa pertinence dans le temps.

---

## Pour comprendre les fascicules de documentation

---

L'attention du lecteur est attirée sur les points suivants :

Du fait de son caractère informatif, le fascicule de documentation ne contient aucune exigence.

Les expressions telles que, **il convient et il est recommandé** sont utilisées pour exprimer une possibilité préférée mais non exigée pour se conformer au présent document. Les formes verbales **peut et peuvent** sont utilisées pour exprimer une suggestion ou un conseil utile mais non obligatoire, ou une autorisation.

En outre, le présent document peut fournir des renseignements supplémentaires destinés à faciliter la compréhension ou l'utilisation de certains éléments ou à en clarifier l'application, sans énoncer d'exigence à respecter. Ces éléments sont présentés sous forme de **notes ou d'annexes informatives**.

---

## Commission de normalisation

---

Une commission de normalisation réunit, dans un domaine d'activité donné, les expertises nécessaires à l'élaboration des normes françaises et des positions françaises sur les projets de norme européenne ou internationale. Elle peut également préparer des normes expérimentales et des fascicules de documentation.

**Si vous souhaitez commenter ce texte, faire des propositions d'évolution ou participer à sa révision**, adressez vous à <norminfo@afnor.org>.

La composition de la commission de normalisation qui a élaboré le présent document est donnée ci-après. Lorsqu'un expert représente un organisme différent de son organisme d'appartenance, cette information apparaît sous la forme : organisme d'appartenance (organisme représenté).

---

---

**Métrologie**
**AFNOR X07B**


---

**Composition de la commission de normalisation**

Président : MME DÉSENFANT

Secrétariat : MME LANGLOIS BERTRAND — AFNOR

MME	AMAROUCHE	LNE
M	ANDRE	CEA CESTA
M	ANTOINE	SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS
MME	BAVELARD	CERIB
MR	BERTRAND	E2M
MME	BERTRAND	SYNDICAT DE LA MESURE
M	BERVAS	RENAULT SAS
M	BOSSART	BNAE
MME	BUIL	SOFIMAE
M	CARRE	COFIP
M	CATHERINE	UTE
MLLE	CHAMBON	LNE
MME	CHMIELIEWSKI	LCPP - LABO CENTRAL PREFECTURE DE POLICE
M	CLAUDEL	CETIAT
M	DAUBENFELD	PEUGEOT CITROEN AUTOMOBILES
MME	DE LUZE	UNM
MR	DEPERETTI	LABORATOIRES POURQUERY SAS
MME	DÉSENFANT	LNE
M	DUBOST	GDF SUEZ
M	DURSENT	LNE
M	EL-GUENNOUNI	DGA - ESSAIS PROPULSEURS
M	FAVRE	LNE
M	FILHOL	SNCF / NORHA
MLLE	FOTI	DGCIS / BUREAU DE LA METROLOGIE
M	JOUIN	CNAM - LCM
MME	LANDA	INERIS
M	LARQUIER	BEA METROLOGIE
M	LEBLOIS	COMMA CONSULTING
M	LEGALL	SEMELEC
MME	LOURENCO	CEA SACLAY
M	MARDELLE	THALES SYSTEMES AEROPORTES
MR	MAYER	DASSAULT AVIATION
MME	MERCKY	SEMELEC
M	MONAT	CTIF
M	MORETTI	ADES
M	MOUCHEL	A+ METROLOGIE
M	MOUROT	GANTOIS INDUSTRIES
M	ODRU	UNPP
M	PENIN	PHILIPPE PENIN (CAST SA - INSACAST)
M	PETIT	CSTB
MME	PONTHIEU	INERIS
M	POU	DELTA MU
MME	RAMIREZ	AFNOR
M	REPOSEUR	ACAC
M	RICHARD	TRESCAL SA
M	RIVIER	CEA MARCOULE
M	SALIN	CEA VALDUC
M	SCHWOB	M SCHWOB JEAN
M	SENELAER	ESM - ECOLE SUP DE METROLOGIE
MR	SESSA	CETIM
MLLE	TAFFOREAU	SOPEMEA
M	VANHALWYN	ROHDE & SCHWARZ FRANCE SAS

## Sommaire

	Page
<b>Avant-propos</b> .....	5
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	5
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	6
<b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....	6
<b>4</b> <b>Symboles et abréviations</b> .....	9
<b>5</b> <b>Programme de caractérisation</b> .....	10
<b>6</b> <b>Préparation de la caractérisation</b> .....	11
<b>7</b> <b>Instrumentation de l'espace de travail</b> .....	13
<b>8</b> <b>Température en régime établi</b> .....	15
<b>9</b> <b>Température en régime transitoire non contrôlé</b> .....	20
<b>10</b> <b>Humidité relative en régime établi</b> .....	22
<b>11</b> <b>Effet du rayonnement des parois</b> .....	27
<b>12</b> <b>Vitesse de l'air</b> .....	27
<b>13</b> <b>Equipements de mesure : caractéristiques générales</b> .....	28
<b>14</b> <b>Incertitude de mesure</b> .....	31
<b>15</b> <b>Vérification d'une enceinte</b> .....	31
<b>16</b> <b>Rapport d'essai</b> .....	33
<b>Annexe A</b> (informative) <b>Exemple de calcul d'écart maximal obtenu sur la valeur de l'humidité relative en fonction de différentes EMT sur la température</b> .....	34
<b>Annexe B</b> (informative) <b>Détermination de l'incertitude de mesure de l'humidité relative Comparaison à titre d'exemple entre trois méthodes de détermination de l'humidité relative en un point de l'espace de travail</b> .....	36
<b>Annexe C</b> (informative) <b>Détermination du régime établi par une méthode statistique</b> .....	38
<b>Annexe D</b> (informative) <b>Calcul de l'incertitude</b> .....	40
<b>Annexe E</b> (informative) <b>Variation de température contrôlée</b> .....	43
<b>Bibliographie</b> .....	44

## Avant-propos

La plupart des matériaux et un grand nombre de matériels subissent les effets conjugués de la température et de l'humidité de l'air.

Pour rendre reproductibles les facteurs de conditionnement préalables et les essais, il convient d'utiliser des enceintes créant des atmosphères bien contrôlées.

Le domaine très étendu des essais, dépendant de la nature même des matériaux, des matériels et de leurs utilisations, conduit à la réalisation d'une grande variété d'enceintes à régulation (température et/ou humidité fixe ou variable), de dimensions diverses.

La caractérisation d'une enceinte consiste à évaluer ses caractéristiques de fonctionnement.

Elle permet :

- au constructeur de communiquer des performances définies selon des conditions conventionnelles et reproductibles ;
- aux utilisateurs de connaître les performances réelles de l'enceinte utilisée ;
- par des mesures périodiques ou ponctuelles, de s'assurer que l'enceinte conserve ses performances dans le temps.

La vérification a pour but de comparer les résultats obtenus à des erreurs maximales tolérées (EMT), à des spécifications issues des méthodes d'essais ou à des données constructeur.

Elle permet :

- lors de la mise en œuvre initiale de ce moyen d'essai, de vérifier la satisfaction aux exigences spécifiées, (besoin exprimé, cahier des charges, normes ou règlements, etc.) ;
- en fonction de la spécificité d'un essai sur un matériel bien déterminé, de s'assurer de l'adéquation de l'enceinte aux exigences de l'essai.

## 1 Domaine d'application

Ce document a pour objet de définir et de préciser les critères pour caractériser et vérifier une enceinte, ainsi que la méthodologie et les moyens à employer.

Il s'applique aux enceintes, avec ou sans circulation d'air forcée, destinées à réaliser à la pression atmosphérique, des essais, dans un environnement thermostatique ou climatique.

Ces enceintes sont à régulation de la température ou de la température et de l'humidité. Certains aménagements ou dispositions nécessaires pour adapter l'enceinte à des essais de matériaux ou matériels particuliers doivent faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'utilisateur.

Les principes et méthodes de caractérisation détaillés dans le présent document ne s'appliquent que dans les plages de température et d'humidité qui suivent :

- température :  $-100\text{ °C} < \theta < +600\text{ °C}$  ;
- humidité de l'air :  $0\% < U_w < 100\%$  pour une température de  $0\text{ °C} < \theta < 100\text{ °C}$ .

Dans le cadre du présent document et afin d'en faciliter la compréhension, le paramètre d'humidité de l'air est exprimé en humidité relative pour se rapprocher de l'expression courante des spécifications d'essai.

La caractérisation de la variation de température contrôlée n'est pas traitée dans ce document.

## 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

X 07-011, *Métrologie — Essais — Métrologie dans l'entreprise — Constat de vérification des moyens de mesure.*

NF X 15-110, *Mesure de l'humidité de l'air — Paramètres hygrométriques.*

NF X 15-112, *Mesure de l'humidité de l'air — Hygromètres à condensation — Caractéristiques.*

NF X 15-113, *Mesure de l'humidité relative de l'air — Hygromètres à variation d'impédance (capacitif et résistif).*

NF X 15-118, *Mesure de l'humidité de l'air — Psychromètres Caractéristiques.*

NF ENV 13005, *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (indice de classement X 07-020).*

NF EN 60068-1, *Essais d'environnement — Partie 1 : Généralités et guide (IDT CEI 68-1) (indice de classement : C 20-700).*

NF EN 60584-1, *Couples thermoélectriques — Partie 1 : Tables de référence (indice de classement : C 42-321).*

NF EN 60751, *Capteurs industriels à résistance thermométrique de platine (indice de classement : C 42-330).*

NF EN ISO 7726, *Ergonomie des ambiances thermiques Appareils de mesure des grandeurs physiques (indice de classement : X 35-202).*

NF EN ISO 10012, *Systèmes de management de la mesure — Exigences pour les processus et les équipements de mesure (indice de classement : X 07-009).*

NF ISO/CEI Guide 99, *Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) (indice de classement : X 07-001).*

NF ISO 5725-2, *Application de la statistique — Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure — Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée (indice de classement : X 06-041-2).*

## 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de la norme NF ISO/CEI Guide 99 (VIM) s'appliquent ainsi que les définitions suivantes.

### 3.1

#### **enceinte**

espace clos dans lequel un ou plusieurs paramètres d'environnement sont contrôlés :

- l'enceinte thermostatique est une enceinte dont la valeur de la température de l'air est contrôlée ;
- l'enceinte climatique est une enceinte dont les valeurs de la température et de l'humidité de l'air sont contrôlées.

NOTE Par convention, dans ce document, seul le terme «enceinte» sera utilisé dans un sens général.

### 3.2

#### **volume intérieur**

volume limité par les parois intérieures, c'est-à-dire par les dimensions intérieures de hauteur, de largeur et de profondeur de l'enceinte

### 3.3

#### **espace de travail**

partie du volume intérieur de l'enceinte dans laquelle les conditions d'environnement spécifiées sont maintenues dans les erreurs maximales tolérées

**3.4****température de l'air dans l'enceinte**

moyenne arithmétique des mesurages de la température de l'air dans l'espace de travail

**3.5****humidité relative de l'air humide par rapport à l'eau (voir norme NF X 15-110)**

l'humidité relative de l'air humide par rapport à l'eau  $U_w$  à la pression  $p$  et à la température  $T$  est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la pression partielle de vapeur d'eau  $e'$  et la pression de vapeur saturante  $e'_{w,p,T}$  que l'air aurait s'il était saturé par rapport à l'eau, à la même pression  $p$  et à la même température  $T$

$$U_w = \left( \frac{e'}{e'_{w,p,T}} \right) \times 100$$

**3.6****humidité relative de l'air dans l'enceinte**

moyenne arithmétique des valeurs d'humidité relative de l'air dans l'espace de travail

Les définitions 3.7 à 3.25 s'appliquent aux paramètres d'environnement de température et/ou d'humidité relative de l'air.

**3.7****condition désirée ou spécifiée**

valeur du paramètre d'environnement à obtenir

**3.8****valeur de consigne**

valeur entrée sur le régulateur pour obtenir la condition désirée ou spécifiée. La valeur de consigne s'exprime dans la même unité que la condition désirée ou spécifiée

**3.9****écart de consigne**

différence entre la valeur de consigne et la valeur moyenne de chaque paramètre d'environnement mesuré dans l'espace de travail

**3.10****environnement**

ensemble des conditions reproduites et contrôlées à l'intérieur de l'enceinte

**3.11****indicateur d'environnement**

équipement associé au système de régulation affichant les paramètres internes de l'enceinte (température et/ou d'humidité relative)

**3.12****erreur d'indication**

différence entre la valeur moyenne de l'indicateur d'environnement et la valeur moyenne de chaque paramètre d'environnement mesuré dans l'espace de travail

**3.13****témoin d'environnement**

chaîne de mesure indépendante du système de régulation

**3.14****régime établi**

état atteint par l'environnement quand les écarts, entre les valeurs en chaque point de l'espace de travail et la valeur de consigne, sont stabilisés pour chacun des paramètres d'environnement

**3.15****régime transitoire**

tout autre état que le régime établi

**3.16****homogénéité**

différence maximale, obtenue en régime établi, entre les moyennes des mesures, augmentées de leur incertitude élargie, dans l'espace de travail pendant la durée des mesures. Elle est exprimée dans la même unité que le paramètre considéré

**3.17****stabilité**

valeur qui caractérise, en un point de l'espace de travail et en régime établi, les variations d'un paramètre d'environnement dans le temps. Elle est exprimée dans la même unité que le paramètre considéré

**3.18****stabilité maximale**

plus grande valeur des stabilités déterminée, pendant la durée des mesures. Elle est exprimée dans la même unité que le paramètre considéré

**3.19****spécimen**

produit destiné à être essayé conformément aux méthodes de la norme NF EN 60068-1

NOTE Un spécimen est dit «dissipant» lorsqu'il dégage de la chaleur. Un spécimen est dit «absorbant» lorsqu'il absorbe de la chaleur.

**3.20****domaine de fonctionnement**

ensemble des conditions d'environnement réalisables

**3.21****domaine(s) d'utilisation**

partie(s) du domaine de fonctionnement dans laquelle(lesquelles) les tolérances spécifiées pour une application sont respectées

**3.22****vitesse de variation de température**

caractéristique de l'aptitude de l'enceinte à passer d'une valeur de température à une autre dans un intervalle de temps

**3.23****dépassement transitoire**

différence entre la valeur extrême indiquée en régime transitoire et la valeur indiquée en réponse à un échelon spécifié de la grandeur mesurée

NOTE L'emploi du terme «overshoot» est déconseillé.

**3.24****erreurs maximales tolérées EMT (voir norme NF ISO/CEI Guide 99 (VIM))**

valeurs extrêmes d'une erreur tolérées par les spécifications, règlements, etc., pour un instrument de mesure donné

NOTE Dans ce document, l'étendue des EMT est égale à la différence en valeur absolue des deux valeurs extrêmes spécifiées.  $EMT = \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  d'où l'étendue est égale à  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**3.25****confirmation métrologique (voir norme NF EN ISO 10012)**

ensemble des opérations requises pour s'assurer de la conformité d'un équipement de mesure avec les exigences prescrites pour l'utilisation projetée

## 4 Symboles et abréviations

Symbole ou abréviation	Unité	Désignation
$U_w$	%	Humidité relative par rapport à l'eau
$e'$	Pa	Pression partielle de vapeur d'eau de l'air humide
$e'_w$	Pa	Pression de vapeur saturante de l'air humide par rapport à l'eau
$p$	Pa	Pression totale d'air
$T, \theta$	K, °C	Température
$\theta_{\text{air}}$	°C	Température de l'air
$U_{w \text{ air}}$	%	Humidité relative de l'air
$m_j$	°C ou %	Moyenne de l'échantillon
$H\theta$	°C	Homogénéité en température
$HU_w$	%	Homogénéité en humidité relative
$\theta_{ji}$	°C	Température du capteur j mesurée au i ième relevé
$U_{wji}$	%	Humidité relative du capteur j mesurée au i ième relevé
$S\theta_j$	°C	Stabilité en température d'un capteur
$SU_{w j}$	%	Stabilité en humidité relative d'un capteur
$S\theta_M$	°C	Stabilité maximale en température
$SU_{wM}$	%	Stabilité maximale en humidité relative
$\Delta\theta_{co}$	°C	Écart de consigne en température
$\Delta U_{w co}$	%	Écart de consigne en humidité relative
$\Delta\theta_{in}$	°C	Erreur d'indication d'environnement en température
$\Delta U_{w in}$	%	Erreur d'indication d'environnement en humidité relative
$\theta_{in}$	°C	Indication d'environnement en température
$U_{w in}$	%	Indication d'environnement en humidité
$\theta_{co}$	°C	Consigne de température Condition désirée ou spécifiée de température
$U_{w co}$	%	Consigne d'humidité relative Condition désirée ou spécifiée d'humidité relative
$v_{mj}(\theta)$	°C/min	Vitesse de variation moyenne en température
$v$	m/s	Vitesse de l'air
$v_j$	m/s	Vitesse moyenne de l'air en un point de l'espace de travail

Symbole ou abréviation	Unité	Désignation
$\theta_d$	°C	Température de rosée
$\theta_{mj}$	°C	Valeur moyenne de la température par capteur
$U_{w\ mj}$	%	Valeur moyenne de l'humidité relative par capteur
EMT	°C ou %	Erreurs maximales tolérées
$k$		Facteur d'élargissement
$n$		Nombre de scrutations
$N$		Nombre de capteurs
$U$	°C ou %	Incertitude élargie associée à la moyenne générale
$u$	°C ou %	Incertitude type composée
$x_{air}$	°C ou %	Moyenne des moyennes d'un paramètre
$x_{mj}$	°C ou %	Valeur moyenne d'un paramètre
$U_{mj}$	°C ou %	Incertitude élargie associée à la valeur moyenne d'un paramètre
$U_{cj}$	°C ou %	Incertitude élargie d'un capteur $j$ de la chaîne de mesure
$x_{co}$	°C ou %	Condition désirée ou spécifiée

## 5 Programme de caractérisation

L'objectif d'une caractérisation est de connaître et/ou de s'assurer périodiquement des performances réelles de l'enceinte. Elle permet de déterminer les caractéristiques qui font l'objet de spécifications. Cette caractérisation est effectuée :

- en absence de spécimen (avec ou sans les aménagements amovibles intérieurs) ;
- en présence de spécimen préalablement défini.

### 5.1 Programme selon l'utilisation de l'enceinte

#### 5.1.1 Utilisation «spécifique»

Le programme à appliquer doit permettre de déterminer les performances de l'enceinte aux conditions spécifiées.

#### 5.1.2 Utilisation «non spécifique»

L'enceinte est destinée à réaliser des conditions d'environnement variées. Le programme à appliquer doit permettre de s'assurer que les caractéristiques spécifiées sont respectées sur l'ensemble du domaine d'utilisation.

Pour une enceinte thermostatique, le programme doit comporter un minimum de deux points de consigne situés aux valeurs extrêmes du domaine d'utilisation et de un point de consigne intermédiaire.

Pour une enceinte climatique, le programme spécifié pour une enceinte thermostatique s'applique. Il doit être complété par trois points d'humidité relative, associés à trois niveaux de température, répartis aux valeurs extrêmes et intermédiaires du domaine d'utilisation, soit neuf points de consigne.

## 5.2 Programme selon le mode de fonctionnement

### 5.2.1 Fonctionnement en régime établi

Sauf stipulations particulières, le programme minimal de caractérisation porte sur les paramètres suivants :

- homogénéité ;
- stabilité ;
- écart de consigne ;
- erreur d'indication (le cas échéant).

Selon le besoin, d'autres paramètres peuvent être caractérisés :

- temps de récupération de la température et de l'humidité relative ;
- dépassement transitoire de la température et de l'humidité relative ;
- vitesse de circulation de l'air ;
- effet du rayonnement des parois.

NOTE D'autres paramètres spécifiques peuvent être caractérisés :

- effet du niveau d'apport d'air neuf ;
- effet du niveau de ventilation ;

Cette liste n'est pas exhaustive.

### 5.2.2 Fonctionnement en régime transitoire

Sauf stipulations particulières, le programme de caractérisation porte sur les paramètres suivants :

- vitesse de variation de la température non contrôlée ;
- dépassement transitoire de la température ;
- paramètres d'un fonctionnement en régime établi si la durée du palier le permet.

Cependant, d'autres paramètres peuvent être caractérisés en accord entre les parties qui doivent, en conséquence, fixer les règles de mise en œuvre.

## 6 Préparation de la caractérisation

### 6.1 Conditions d'ambiance

Les opérations de caractérisation doivent être menées dans des conditions d'ambiance compatibles avec le fonctionnement de l'enceinte.

Sauf stipulations particulières, les opérations de caractérisation sont menées dans les conditions d'ambiance recommandées par la norme NF EN 60068-1, à savoir :

- température de + 15 °C à + 35 °C ;
- humidité relative de 25 % à 75 % ;
- pression atmosphérique de 860 hPa à 1 060 hPa.

NOTE Le dégagement de chaleur inhérent au fonctionnement des enceintes et spécialement de celles comportant un groupe frigorifique à refroidissement à air peut provoquer une élévation de la température ambiante et entraîner une diminution des performances de l'enceinte.

D'autres grandeurs d'influence peuvent intervenir, entre autre :

- pollution de toutes natures (poussières, colles, solvants, ...) ;
- rayonnement solaire ;
- vibrations acoustiques.

## 6.2 Alimentation électrique

L'alimentation électrique doit correspondre aux prescriptions de la norme UTE C 00-230 notamment :

- tensions : 230/400 V à  $\pm 10$  % ;
- fréquence : 50 Hz.

NOTE Les fluctuations de la tension et de la fréquence peuvent entraîner des variations dans les performances de l'enceinte non compatibles avec les exigences.

## 6.3 Alimentation en fluides divers

La nature et les caractéristiques des fluides indispensables au fonctionnement de l'enceinte doivent être indiquées par le constructeur, en particulier pour l'eau de refroidissement et l'eau d'alimentation des dispositifs d'humidification.

L'utilisateur de l'enceinte doit vérifier que ces fluides sont en accord avec les prescriptions des essais qu'il doit réaliser.

NOTE La qualité, le débit, la pression et la température de l'eau de refroidissement peuvent influencer sur les performances de l'enceinte.

## 6.4 Perturbations liées à l'enceinte

L'enceinte génère ou transmet des perturbations susceptibles d'affecter les essais ou le spécimen. Elles peuvent être :

- des vibrations mécaniques ;
- de la pollution de toutes natures ;
- du givrage ou de la condensation ;
- de la corrosion ;
- un renouvellement de l'air ;
- une diffusion non uniforme de la vapeur d'eau ;
- le rayonnement des parois.

Cette énumération n'étant pas exhaustive, l'utilisateur doit s'assurer de la compatibilité du moyen à ses besoins.

## 6.5 Perturbations liées au spécimen

Le spécimen, installé dans l'enceinte, est lui-même la cause de certaines perturbations. Il importe, par conséquent, de prendre notamment en considération :

- les masse, nature, forme, dimension du spécimen ;
- l'influence du spécimen sur la circulation de l'air dans l'enceinte ;
- le pouvoir d'émission ou l'absorption de vapeur d'eau ;
- le rayonnement thermique d'un spécimen dissipatif ;
- les risques de pollution de l'atmosphère de l'enceinte (dégazage, émissions de vapeurs corrosives, inflammables, explosives, conductrices, émissions de poussières, etc.) ;
- les vibrations engendrées par un spécimen en fonctionnement ;
- les perturbations électromagnétiques dues au spécimen.

NOTE L'attention est attirée sur le fait que des spécimens différents peuvent entraîner des résultats différents lors des caractérisations.

Il faut s'assurer que le volume et la forme du (des) spécimen(s) permettent la libre circulation de l'air dans l'enceinte.

## 7 Instrumentation de l'espace de travail

L'espace de travail est délimité par la position des capteurs de mesure (voir Figure 1), définie en fonction :

- des dimensions intérieures de l'enceinte ;
- de la présence d'éléments amovibles dans l'enceinte ;
- de la présence ou non de spécimen.

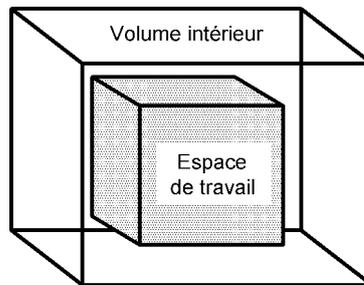


Figure 1 — Représentation de l'espace de travail dans le volume intérieur

### 7.1 Emplacement des capteurs de température

#### 7.1.1 Caractérisation en l'absence de spécimen

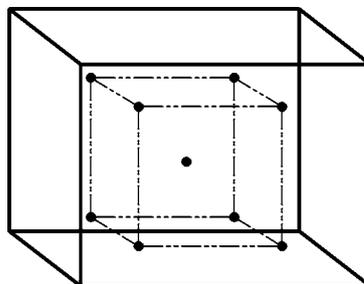
Sauf stipulation particulière, les capteurs de température sont placés à une distance des parois égale au  $1/10^{\circ}$  de chacune des dimensions du volume intérieur (largeur, hauteur, profondeur).

L'emplacement des capteurs utilisés pour la caractérisation constitue un échantillon supposé représentatif de l'espace de travail. Cependant, on ne dispose pas, le plus souvent, de modèle théorique de répartition de la température dans l'enceinte. On étend, par convention, les conclusions faites à partir des indications de ces capteurs à l'ensemble de l'espace de travail.

##### 7.1.1.1 Volume inférieur ou égal à $2 \text{ m}^3$ (voir Figure 2)

La caractérisation est effectuée avec neuf capteurs :

- un capteur situé à chacun des angles de l'espace de travail ;
- un capteur situé au centre du volume ainsi délimité.



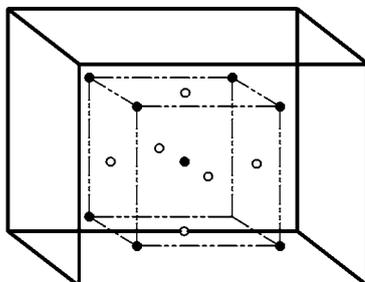
● Capteur de température

Figure 2 — Emplacement des capteurs de température pour des volumes intérieurs ou égaux à  $2 \text{ m}^3$

### 7.1.1.2 Volume supérieur à 2 m<sup>3</sup> et inférieur ou égal à 20 m<sup>3</sup> (voir Figure 3)

À condition qu'aucune des dimensions du volume intérieur n'excède 3 m, la caractérisation est effectuée avec 15 capteurs :

- neuf capteurs placés comme précédemment ;
- six capteurs répartis au centre des surfaces qui délimitent l'espace de travail.



- Capteur de température placé aux coins et au centre du volume délimité
- Capteur de température placé au centre des surfaces délimitées

**Figure 3 — Emplacement des capteurs de température pour des volumes supérieurs à 2 m<sup>3</sup> et inférieurs ou égaux à 20 m<sup>3</sup>**

### 7.1.1.3 Autres volumes

Pour les autres volumes, le nombre et l'emplacement des capteurs de température doivent faire l'objet d'un accord entre les parties concernées.

## 7.1.2 Caractérisation en présence de spécimen

### 7.1.2.1 Spécimen non dissipant

Les emplacements définis précédemment sont maintenus. Les capteurs de température doivent être placés à plus de 50 mm du spécimen.

Si aucun capteur de température ne peut être placé au centre du volume, le capteur est déplacé à 50 mm de la face du spécimen et exposé à l'arrivée du flux d'air.

### 7.1.2.2 Spécimen dissipant

Les capteurs de température doivent être placés de sorte qu'ils ne soient pas perturbés par la dissipation du spécimen.

L'emplacement des capteurs de température dans une telle configuration doit faire l'objet d'une concertation et d'un accord entre les parties concernées.

## 7.2 Emplacement des capteurs d'humidité

L'humidité relative doit être déterminée aux mêmes emplacements que la température. L'(Les)hygromètre(s) est(sont) placé(s) dans l'espace de travail en prenant soin de ne pas créer de perturbations vis-à-vis des capteurs de température.

NOTE 1 La température de rosée est considérée uniforme dans le volume intérieur de l'enceinte. Cette caractéristique permet d'utiliser un seul capteur déterminant la température de rosée dans l'espace de travail.

NOTE 2 En cas d'utilisation d'un hygromètre avec capteur mesurant directement l'humidité relative, il convient, pour améliorer le résultat final, de placer un même nombre de capteurs d'humidité relative que de capteurs de température à proximité de ces derniers.

### **7.2.1 Caractérisation en l'absence de spécimen**

Voir en 7.1.1 la définition de l'implantation des capteurs de température.

### **7.2.2 Caractérisation en présence de spécimen**

#### **7.2.2.1 *Spécimen non dissipant***

Le(s) emplacement(s) énoncé(s) ci-dessus sont maintenus en gardant les règles suivies pour les capteurs de température (voir en 7.1.2.1).

#### **7.2.2.2 *Spécimen dissipant***

La règle décrite en 7.1.2.2 s'applique.

## **8 Température en régime établi**

### **8.1 Présentation**

Le présent article 8 traite de la température de l'air dans l'espace de travail. Les paramètres à évaluer sont définis dans le programme de caractérisation (voir article 5).

### **8.2 Opérations préliminaires**

— Les capteurs sont mis en place.

— La valeur de consigne est introduite dans le régulateur suivant le programme défini.

Tous les paramètres réglables doivent être fixés et relevés.

### **8.3 Détermination du régime établi**

Les mesures utilisées pour déterminer les paramètres définis dans le programme sont prises en compte lorsque le régime est établi. Son origine est déterminée par une méthode graphique ou par une méthode statistique.

#### **8.3.1 Méthode graphique**

Cette méthode consiste à suivre l'évolution de tous les capteurs délimitant l'espace de travail avec un enregistrement jusqu'à stabilisation de chacun des paramètres d'environnement.

Le début du régime établi est conventionnellement obtenu lorsque les écarts entre les variations des valeurs mesurées en chaque point de l'espace de travail et la valeur de consigne sont constants. Ces variations sont estimées par lecture graphique par un opérateur. Son estimation est une source d'incertitude sur le début des mesures.

#### **8.3.2 Méthode statistique**

L'objet de cette méthode est de fournir un moyen indépendant de l'opérateur, directement applicable et automatisable. Elle est présentée en Annexe C.

## 8.4 Mesurages en régime établi

Les indications des capteurs sont relevées au maximum toutes les minutes.

Au moins 30 relevés par capteur sont effectués, une fois le régime établi atteint. La durée des mesures est au minimum de 30 min. Il est nécessaire d'adapter la durée des mesures aux variations périodiques liées au fonctionnement normal d'une enceinte.

Les paramètres calculés sont la température moyenne par capteur  $\theta_{mj}$  et la température pour l'enceinte  $\theta_{air}$ .

— **1<sup>ère</sup> étape** : température moyenne par capteur  $\theta_{mj}$  : moyenne arithmétique des  $n$  mesures à l'issue de la durée des mesures :

$$\theta_{mj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{ji}$$

où

$n$  est le nombre de mesurages ;

$\theta_{ji}$  est la température du capteur  $j$  mesurée au  $i$  ième relevé ;

$j$  est le numéro du capteur de température ;

— **2<sup>ème</sup> étape** : température de l'air  $\theta_{air}$  : moyenne arithmétique des valeurs moyennes de la température par capteur pendant la durée des mesures :

$$\theta_{air} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \theta_{mj}$$

où

$N$  est le nombre de capteurs.

## 8.5 Homogénéité

### 8.5.1 Principe

La caractérisation en température dans l'espace de travail permet de déterminer, pendant la durée des mesurages, l'homogénéité.

### 8.5.2 Exploitation

L'homogénéité  $H\theta$  est la différence maximale, obtenue en régime établi, entre les moyennes des mesures  $\theta_{mj}$  augmentées de leur incertitude élargie  $U_{mj}$ , dans l'espace de travail pendant la durée des mesures (voir Figure 4 et Annexe D).

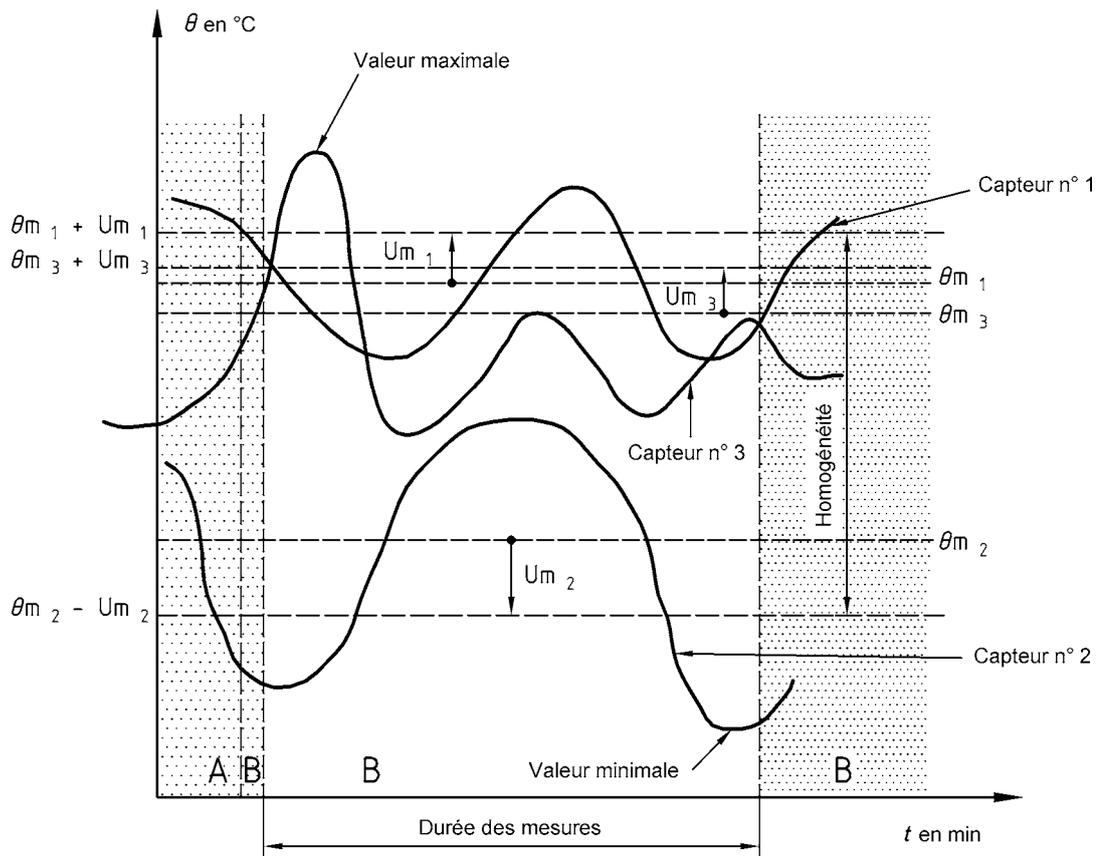
$$H\theta = \max_{j \in (1, \dots, N)} \left( \theta_{mj} + U_{mj} \right) - \min_{j \in (1, \dots, N)} \left( \theta_{mj} - U_{mj} \right)$$

NOTE Dans certains cas, par exemple, lors d'une application avec des spécimens de faible inertie, l'utilisateur peut être intéressé par les valeurs extrêmes des températures mesurées dans l'espace de travail.

Par convention, pour déterminer l'**homogénéité** maximale, l'incertitude élargie  $U_{cj}$  associée aux valeurs du capteur  $j$  est prise en compte. Ces valeurs sont augmentées de l'incertitude élargie  $U_{cj}$  associée à l'incertitude de mesure du capteur.

$$H\theta_M = \max_{i \in (1, \dots, n)} \left( \theta_{ji} + U_{cj} \right) - \min_{i \in (1, \dots, n)} \left( \theta_{ji} - U_{cj} \right)$$

Cette détermination fait l'objet d'une analyse spécifique précisée dans la revue de contrat.



**Légende**

- A Régime non établi
- B Régime établi

**Figure 4 — Homogénéité (exemple limité à 3 capteurs)**

**8.6 Stabilité**

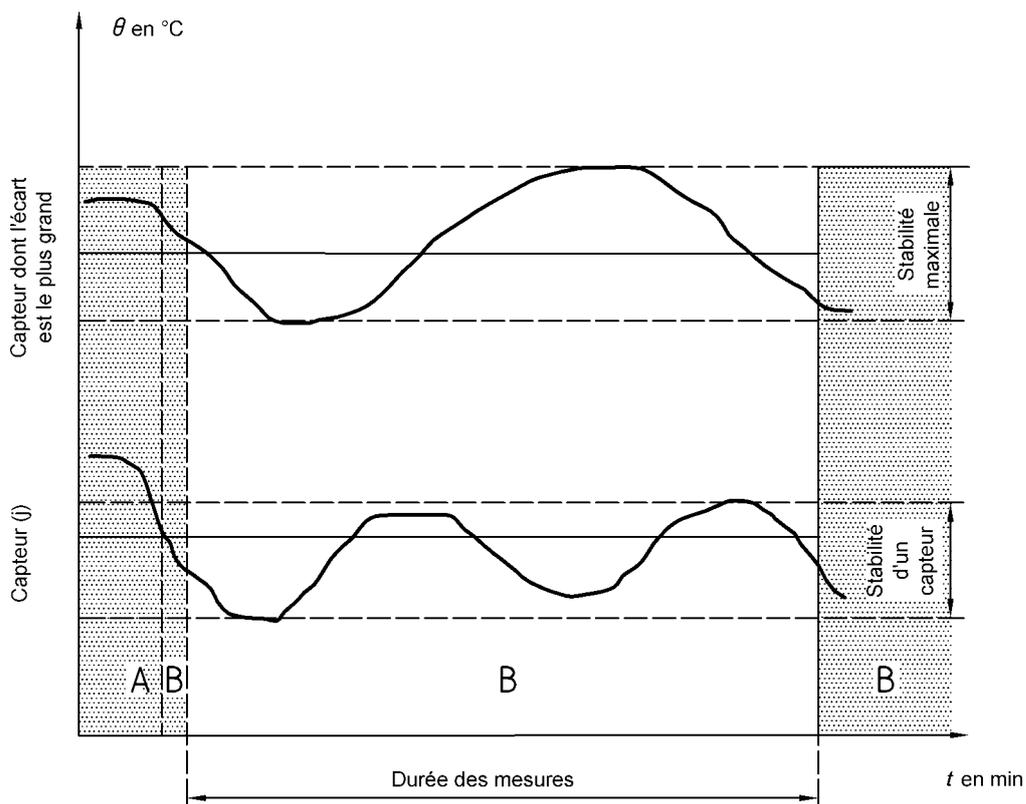
**8.6.1 Principe**

La caractérisation de la stabilité de la température dans l'espace de travail permet de déterminer la variation de température maximale en un point de mesure de l'espace de travail pendant la durée des mesures.

**8.6.2 Exploitation**

Les paramètres suivants sont calculés :

- stabilité du point  $j$   $S\theta_j$ , différence entre les valeurs maximale et minimale mesurées en ce point pendant la durée des mesures (voir Figure 5) ;
- stabilité maximale  $S\theta_M$ , valeur maximale des valeurs de stabilité  $S\theta_j$  pendant la durée des mesures (voir Figure 5).



### Légende

- A Régime non établi
- B Régime établi

Figure 5 — Stabilité maximale et stabilité d'un point de l'espace de travail

## 8.7 Écart de consigne $\Delta\theta_{co}$

### 8.7.1 Principe

L'écart de consigne permet de connaître la correction à apporter à la valeur de consigne lors de l'utilisation de l'enceinte pour obtenir la condition désirée ou spécifiée.

### 8.7.2 Exploitation

L'écart de consigne  $\Delta\theta_{co}$  est la différence entre la valeur de consigne  $\theta_{co}$  et la température de l'air  $\theta_{air}$ .

$$\Delta\theta_{co} = \theta_{co} - \theta_{air}$$

Pour obtenir la condition désirée ou spécifiée, une correction peut être apportée par un décalage de consigne. Cette opération doit figurer dans le rapport de caractérisation. Une nouvelle caractérisation est nécessaire pour valider cette action.

## 8.8 Erreur d'indication $\Delta\theta_{in}$

### 8.8.1 Principe

L'erreur d'indication permet de caractériser la représentativité des valeurs affichées par l'indicateur d'environnement.

### 8.8.2 Exploitation

L'erreur d'indication  $\Delta\theta_{in}$  est la différence entre la valeur moyenne d'indication d'environnement en température  $\theta_{in}$  et la température de l'air  $\theta_{air}$  (voir Figure 6).

$$\Delta\theta_{in} = \theta_{in} - \theta_{air}$$

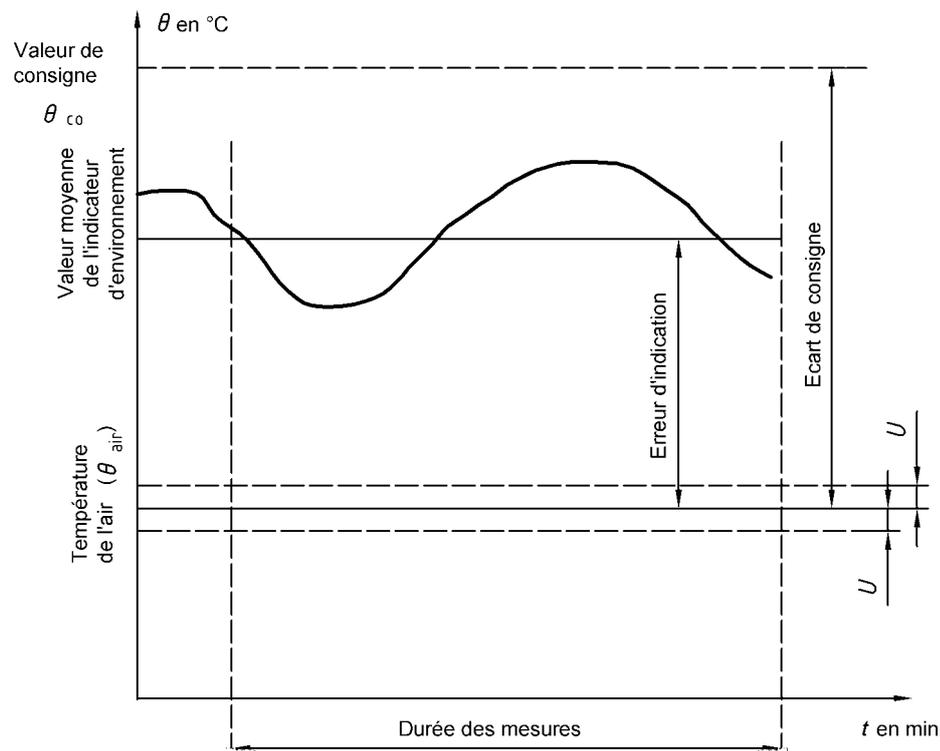


Figure 6 — Écart de consigne et erreur d'indication

## 8.9 Temps de récupération de la température

### 8.9.1 Principe

L'enceinte étant en régime établi, le temps de récupération est la durée nécessaire pour que l'environnement retrouve le régime établi après une perturbation. Ce temps est mesuré à partir d'une action volontaire (ouverture de porte, coupure d'alimentation, etc.) dont la durée doit être spécifiée.

Dans le cas d'une ouverture de porte, le temps d'ouverture est d'une minute avec une ouverture totale (sauf spécifications particulières).

### 8.9.2 Exploitation

Le temps est compté à partir de la fin de la perturbation volontaire.

Le temps de récupération est exprimé en minutes. L'intervalle de temps entre deux mesurages doit être adapté au phénomène observé.

## 8.10 Dépassement transitoire de la température

### 8.10.1 Principe

C'est un phénomène qui peut se produire avant d'atteindre le régime établi.

### 8.10.2 Exploitation

Ce phénomène n'est pas modélisable a priori. Ses effets peuvent être enregistrés.

Le dépassement transitoire est déterminé à partir des relevés effectués lors d'une caractérisation d'homogénéité ou de stabilité.

Cette valeur est déterminée pour chacun des capteurs installés dans l'espace de travail.

## 9 Température en régime transitoire non contrôlé

### 9.1 Présentation

Le présent article traite de la variation de la température de l'air dans l'espace de travail. Les paramètres à évaluer sont définis dans le programme de caractérisation (voir article 5).

### 9.2 Opérations préliminaires

Les capteurs de température sont mis en place (voir les particularités en 9.4).

La valeur de consigne est introduite dans le régulateur suivant le programme défini.

### 9.3 Principe

La caractérisation de la variation de la température dans l'espace de travail permet de déterminer la vitesse de variation entre deux paliers de température pendant la durée des mesures.

Par convention, la zone comprise entre 10 % et 90 % de l'échelon de température est prise en compte (voir Figure 7).

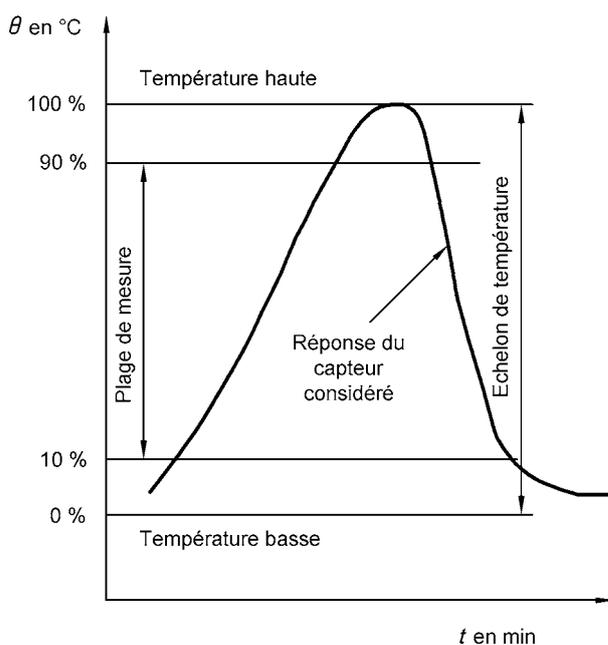


Figure 7 — Variation de température dans l'espace de travail

La détermination est effectuée pour chaque capteur de température (voir Figure 8).

La caractérisation est effectuée en l'absence ou en présence d'un spécimen placé dans l'espace de travail :

- une caractérisation, effectuée en l'absence d'un spécimen, a pour but d'établir des données de base permettant de faire des comparaisons ;
- une caractérisation, effectuée en présence d'un spécimen, est utilisée pour vérifier l'application de spécifications particulières.

#### 9.4 Particularités

La caractérisation de la variation de température entraîne les particularités suivantes au sujet de l'instrumentation de l'espace de travail :

- configuration «en l'absence d'un spécimen» : la détermination des différentes vitesses de variation est effectuée aux emplacements des capteurs de température (voir article 7) ;
- configuration «en présence d'un spécimen» : ce dernier perturbe la circulation de l'air. Il faut prendre en compte les capteurs placés en amont du spécimen par rapport à l'arrivée d'air, le capteur centré est quant à lui déplacé en amont du spécimen et au maximum aligné sur les capteurs délimitant l'arête ou la surface soumise à l'arrivée de l'air.

#### 9.5 Mesures

La durée de variation relevée est le temps mis pour passer de 10 % à 90 % (ou inversement) de l'échelon de température. Pour chaque capteur, les valeurs de température à prendre en compte sont celles qui approchent au plus près les valeurs théoriques de 10 % et 90 % de l'échelon (voir Figure 8).

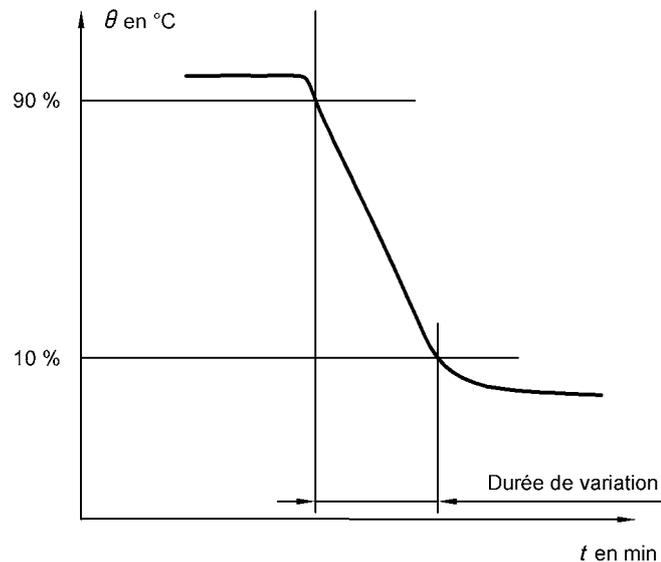


Figure 8 — Exemple

## 9.6 Exploitation

La vitesse de variation moyenne  $v_{mj}(\theta)$ , est calculée par capteur selon la formule suivante :

$$v_{mj}(\theta) = \frac{|\theta_{j10\%} - \theta_{j90\%}|}{|t_{j10\%} - t_{j90\%}|}$$

La plus petite valeur de  $v_{mj}(\theta)$  est retenue comme valeur de la vitesse de variation de la température en régime transitoire non contrôlé.

## 9.7 Dépassement transitoire

Se reporter en 8.10.

# 10 Humidité relative en régime établi

## 10.1 Présentation

Le présent article traite de l'humidité relative de l'air dans l'espace de travail. Les paramètres à évaluer dans une enceinte sont définis dans le programme de caractérisation (voir article 5).

## 10.2 Opérations préliminaires

Les capteurs de température et d'hygrométrie sont mis en place.

Les valeurs de consigne sont introduites dans le régulateur suivant le programme défini.

Tous les paramètres réglables doivent être définis et relevés.

## 10.3 Détermination du régime établi

Les mesures utilisées pour déterminer les paramètres définis dans le programme sont prises en compte lorsque le régime est établi. Son origine est déterminée par une méthode graphique ou par une méthode statistique.

### 10.3.1 Méthode graphique

Cette méthode consiste à suivre l'évolution de tous les capteurs délimitant l'espace de travail avec un enregistrement jusqu'à stabilisation de chacun des paramètres d'environnement.

Le début du régime établi est conventionnellement obtenu lorsque les écarts entre les variations des valeurs mesurées et/ou déterminées en chaque point de l'espace de travail et la valeur de consigne sont constants. Ces variations sont estimées par lecture graphique par un opérateur. Son estimation est une source d'incertitude sur le début des mesures.

### 10.3.2 Méthode statistique

L'objet de cette méthode est de fournir un moyen indépendant de l'opérateur, directement applicable et automatisable. Elle est présentée en Annexe C.

## 10.4 Méthodes de détermination de l'humidité relative

La détermination de l'humidité relative est effectuée, à chaque relevé, selon les méthodes A, B ou C détaillées ci-après. Le critère de choix de l'une de ces méthodes est l'incertitude sur cette détermination. Ces méthodes sont applicables pour une température de rosée uniforme dans un volume inférieur ou égal à 20 m<sup>3</sup>.

Les mesurages des hygromètres et des capteurs de température de l'air sont effectués simultanément et les résultats sont enregistrés.

### 10.4.1 Utilisation d'un hygromètre à condensation (Méthode A)

Cette méthode consiste à :

- mesurer la température de rosée, en un point de l'espace de travail ;
- calculer la valeur de l'humidité relative en chaque point de mesure des températures  $\theta_j$ , pour chaque relevé ;
- déterminer l'incertitude sur l'humidité relative en chaque point de température (Annexe D).

### 10.4.2 Utilisation d'un psychromètre (Méthode B)

Cette méthode consiste à :

- déterminer la température de rosée, pour chaque relevé, à partir des températures humide et sèche mesurées par le psychromètre, en un point de mesure de l'espace de travail ;
- calculer la valeur de l'humidité relative en chaque point de mesure des températures  $\theta_j$  ;
- déterminer l'incertitude sur l'humidité relative en chaque point de température (Annexe D).

Un seul relevé de la pression régnant à l'intérieur de l'enceinte est effectué pendant la durée des mesures.

### 10.4.3 Utilisation d'un hygromètre à variation d'impédance (Méthode C)

Deux cas sont à considérer, cependant la méthode à un seul capteur est préjudiciable à l'obtention d'une incertitude minimale.

#### 10.4.3.1 Nombre de capteurs d'humidité relative égal à celui des capteurs de température

Les capteurs d'humidité relative sont placés à proximité de chaque capteur de température.

#### 10.4.3.2 Utilisation d'un seul capteur d'humidité relative

Il est nécessaire de :

- relever les valeurs de l'humidité  $U_{wi}$  relative au point de mesure où il est installé et toutes les valeurs des températures des capteurs  $\theta_{ji}$  ;
- déterminer la température de rosée  $\theta_{di}$  pour chacun des relevés de  $U_{wi}$  et  $\theta_{ji}$  ;
- calculer les valeurs de l'humidité relative  $U_{wji}$  en chaque point de mesure des températures  $\theta_{ji}$  ;
- déterminer l'incertitude de mesure à l'emplacement du capteur d'humidité et la recalculer à l'emplacement de chaque capteur  $\theta_j$  (voir Annexe B).

NOTE Il est recommandé de mesurer l'humidité relative en chacun des points de température afin de minimiser les incertitudes.

## 10.5 Mesurages en régime établi

Les indications des capteurs sont relevées au maximum toutes les minutes. Au moins 30 relevés par capteur sont effectués, une fois le régime établi atteint. La durée des mesures est au minimum de 30 min. Il est nécessaire d'adapter la durée des mesures aux variations périodiques liées au fonctionnement normal de l'enceinte.

Les paramètres suivants sont calculés :

— température de l'air  $\theta_{\text{air}}$  : Voir en 8.4 ;

— humidité relative de l'air  $U_{\text{w air}}$  :

- **1<sup>ère</sup> étape** : L'humidité relative moyenne, déterminée à l'emplacement de chaque capteur de température,  $U_{\text{w mj}}$  est la moyenne arithmétique des  $n$  mesures ou déterminations à l'issue de la durée des mesures :

$$U_{\text{w mj}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\text{w ji}}$$

où

$n$  est le nombre de mesurages ;

$U_{\text{w ji}}$  est l'humidité relative mesurée ou déterminée à la  $i$  ième scrutation ;

$j$  est le numéro du capteur de température pour une détermination de  $U_{\text{w ji}}$  par calcul ou celui du capteur d'humidité relative (voir en 10.4.3.1).

- **2<sup>ème</sup> étape** : L'humidité relative de l'air  $U_{\text{w air}}$  est la moyenne arithmétique des valeurs moyennes de l'humidité relative en chaque point de mesure de l'espace de travail pendant la durée des mesures.

$$U_{\text{w air}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U_{\text{w mj}}$$

où

$N$  est le nombre de capteurs de température, (cas de l'utilisation d'un seul capteur d'humidité ou le nombre de capteurs d'humidité (voir 10.4.3.1).

## 10.6 Homogénéité

### 10.6.1 Principe

La caractérisation en humidité relative dans l'espace de travail permet de déterminer, pendant la durée des mesurages, l'homogénéité.

### 10.6.2 Exploitation

Les paramètres calculés ci-après sont indissociables :

— homogénéité en température  $H\theta$  : Voir en 8.5 ;

— homogénéité en humidité relative  $HU_{\text{w}}$  : Différence maximale, obtenue en régime établi, entre les moyennes des mesures  $U_{\text{wmj}}$ , augmentées de leur incertitude élargie  $U_{\text{mj}}$ , dans l'espace de travail pendant la durée des mesures (voir Annexe D)

$$HU_{\text{w}} = \max_{j \in (1, \dots, N)} (U_{\text{wmj}} + U_{\text{mj}}) - \min_{j \in (1, \dots, N)} (U_{\text{wmj}} - U_{\text{mj}})$$

NOTE Dans certains cas, par exemple, lors d'une application avec des spécimens de faible inertie, l'utilisateur peut être intéressé par les valeurs extrêmes des humidités relatives calculées ou mesurées dans l'espace de travail.

Par convention, pour déterminer l'**homogénéité** maximale, l'incertitude élargie  $U_{cj}$  associée aux valeurs du capteur  $j$  est prise en compte. Ces valeurs sont augmentées de l'incertitude élargie  $U_{cj}$  associée à l'incertitude de mesure du capteur.

$$HU_{wM} = \max_{i \in (1, \dots, n)} (U_{wji} + U_{cj}) - \min_{i \in (1, \dots, n)} (U_{wji} - U_{cj})$$

Cette détermination fait l'objet d'une analyse spécifique précisée dans la revue de contrat.

## 10.7 Stabilité

### 10.7.1 Principe

La caractérisation de la stabilité de l'humidité relative dans l'espace de travail permet de déterminer la variation de l'humidité relative maximale en un point de mesure de l'espace de travail, pendant la durée des mesures.

Cette caractérisation s'effectue simultanément avec celle de la stabilité de la température traitée en 8.6.

### 10.7.2 Exploitation

Les paramètres suivants sont calculés :

— humidité relative

- stabilité au point  $j$   $SU_{wj}$  : différence entre les valeurs maximale et minimale de l'humidité relative déterminée pendant la durée des mesures (voir Figure 5) ;
- stabilité maximale  $SU_{wM}$  : valeur maximale des stabilités  $SU_{wj}$  pendant la durée des mesures (voir Figure 5).

## 10.8 Écart de consigne

### 10.8.1 Principe

L'écart de consigne permet de connaître la correction à apporter à la valeur de consigne lors de l'utilisation de l'enclencheur, pour obtenir la condition désirée ou spécifiée.

### 10.8.2 Exploitation

L'écart de consigne est calculé pour la grandeur température et la grandeur humidité relative :

— l'écart de consigne en température  $\Delta\theta_{co}$  est la différence entre la valeur de consigne  $\theta_{co}$  et la température de l'air  $\theta_{air}$  (voir Figure 6) :

$$\Delta\theta_{co} = \theta_{co} - \theta_{air}$$

— l'écart de consigne en humidité relative  $\Delta U_{wco}$  est la différence entre la valeur de consigne  $U_{wco}$  et la valeur de l'humidité relative de l'air  $U_{wair}$  (voir Figure 6) :

$$\Delta U_{wco} = U_{wco} - U_{wair}$$

Pour obtenir la condition désirée ou spécifiée, une correction peut être apportée par un décalage de consigne. Cette opération doit figurer dans le rapport de caractérisation. Il est nécessaire de valider cette action par une nouvelle caractérisation.

## 10.9 Erreur d'indication

### 10.9.1 Principe

L'erreur d'indication permet de caractériser la représentativité des valeurs affichées par l'indicateur d'environnement.

### 10.9.2 Exploitation

L'erreur d'indication est calculée pour la grandeur température et la grandeur humidité relative :

— l'erreur d'indication  $\Delta\theta_{in}$  est la différence entre la valeur moyenne d'indication d'environnement en température  $\theta_{in}$  et la température de l'air  $\theta_{air}$  (voir Figure 6) ;

$$\Delta\theta_{in} = \theta_{in} - \theta_{air}$$

— l'erreur d'indication en humidité relative  $\Delta U_{w\ in}$  est la différence entre la valeur moyenne d'indication d'environnement  $U_{w\ in}$  et la valeur de l'humidité relative de l'air  $U_{w\ air}$  (voir Figure 6) ;

$$\Delta U_{w\ in} = U_{w\ in} - U_{w\ air}$$

## 10.10 Temps de récupération de l'humidité relative

### 10.10.1 Principe

L'encontre étant en régime établi, le temps de récupération est la durée nécessaire pour que l'environnement retrouve le régime établi après une perturbation. Ce temps est mesuré à partir d'une action volontaire (ouverture de porte, coupure d'alimentation, etc.) dont la durée doit être spécifiée.

Dans le cas d'une ouverture de porte, le temps d'ouverture est d'une minute avec une ouverture totale (sauf spécifications particulières).

### 10.10.2 Exploitation

Le temps est compté à partir de la fin de la perturbation volontaire.

Le temps de récupération est exprimé en minutes. L'intervalle de temps entre deux mesurages doit être adapté au phénomène observé.

## 10.11 Dépassement transitoire en humidité relative

### 10.11.1 Principe

C'est un phénomène qui peut se produire avant d'atteindre le régime établi.

### 10.11.2 Exploitation

Ce phénomène n'est pas modélisable a priori. Ces effets peuvent être enregistrés.

Des effets perturbateurs (par exemple, condensation) peuvent en résulter et faire l'objet d'un constat.

## 11 Effet du rayonnement des parois

### 11.1 Principe

La mesure effectuée par les capteurs de température, ainsi que les spécimens peuvent être influencés par le rayonnement des parois.

Lorsqu'un capteur de température est en équilibre thermique, la somme des échanges de chaleur par convection et par rayonnement est nulle. La valeur de la température d'équilibre du capteur dépend des caractéristiques géométriques et de la nature des matériaux constitutifs des parois de l'enceinte et du capteur ainsi que de la position relative du capteur par rapport aux parois.

Ce qui est vérifiable pour un capteur de température peut être admis pour un spécimen qui sera placé dans une enceinte. Il est important de vérifier que les effets du rayonnement des parois restent dans des limites spécifiées.

### 11.2 Méthode

La norme NF EN ISO 7726 doit être appliquée pour la description de la méthode et de l'instrumentation.

NOTE Il est nécessaire de connaître la vitesse de circulation de l'air.

## 12 Vitesse de l'air

### 12.1 Présentation

Le présent article permet de déterminer, dans une enceinte, la valeur de la vitesse de l'air dans l'espace de travail.

NOTE La vitesse de l'air est un paramètre très complexe à mesurer. Elle est fonction notamment du taux d'occupation de l'enceinte et de la manière dont le volume est occupé. Sa mesure en présence de spécimen est très difficile. En conséquence, il est préconisé d'effectuer la caractérisation en l'absence de spécimen. De plus, l'une des difficultés pour mesurer la vitesse de l'air est d'en connaître au préalable la direction.

Les paramètres ci-après sont déterminés en chaque emplacement de mesure de la température sèche :

- vitesse maximale ;
- vitesse minimale.

En conséquence, une estimation de la vitesse de circulation d'air dans l'enceinte est associée à une incertitude importante. Sa valeur n'est donnée qu'à titre indicatif.

### 12.2 Opérations préliminaires

- S'assurer que le spécimen est absent.
- Mettre en place le capteur en prenant soin que le dispositif de maintien en position ne perturbe pas la circulation de l'air.
- Fermer la porte.
- S'assurer que la température de mesure est proche de la température d'étalonnage du capteur.

### 12.3 Mesures

La mesure de la vitesse de l'air est effectuée en chaque point de mesure de l'espace de travail.

Si on dispose d'un nombre de capteurs égal au nombre de capteurs de température, les mesures sont effectuées simultanément, sinon il est nécessaire de déplacer le capteur unique.

Les indications des capteurs sont relevées à 10 reprises avec un intervalle de mesure supérieur à 10 s.

### 12.4 Exploitation

Les paramètres suivants sont calculés :

— vitesse de l'air en un point  $v_j$  : moyenne des 10 résultats de mesurage en ce point :

$$v_j(\text{air}) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} v_i$$

$v_{\max} = \max [v_j]$  est la valeur maximale des 10 mesures en ce point ;

$v_{\min} = \min [v_j]$  est la valeur minimale des 10 mesures en ce point.

## 13 Équipements de mesure : caractéristiques générales

### 13.1 Capteurs de température

Les principaux types de capteurs thermométriques utilisés pour la caractérisation des enceintes sont :

- à résistance de platine ;
- à couples thermoélectriques.

Ils doivent être de faible dimension et montés dans des gaines de diamètre extérieur autour de l'élément sensible inférieur à 5 mm.

Le capteur de température sous gaine métallique doit posséder une étanchéité parfaite afin que l'élément sensible ne soit jamais en contact avec de la vapeur d'eau condensable.

La dimension du capteur conditionne son temps de réponse. Il est de  $60 \text{ s} \pm 15 \text{ s}$  en air calme pour un diamètre de 3 mm.

Par exemple : l'utilisation d'une sonde de 3 mm de diamètre peut conduire à une sous-estimation de 25 % de la stabilité de la température dans l'espace de travail d'une enceinte faiblement ventilée dont la température de l'air varie avec une période de 3 min. Dans les mêmes conditions, l'erreur est inférieure à 10 % pour une période de 8 min.

#### 13.1.1 Capteurs à résistance de platine

Les capteurs les plus couramment utilisés sont de type Pt 100 ( $100 \Omega$  à  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Leurs caractéristiques sont données dans la norme NF EN 60751.

Le raccordement du capteur sur le système de mesure doit être adapté afin de minimiser les effets dus aux fils de liaison (montage en trois ou quatre fils).

### 13.1.2 Couples thermoélectriques

Les capteurs les plus couramment utilisés sont de :

- type T : Cuivre / Cuivre-Nickel ;
- type J : Fer / Cuivre-Nickel ;
- type K : Nickel-Chrome / Nickel-Aluminium.

Leurs caractéristiques sont données dans la norme NF EN 60584-1.

NOTE Si les fils de liaison des couples thermoélectriques sont directement reliés au système de mesure, il faut prendre les précautions suivantes :

- effectuer les corrections de soudure froide, généralement par rapport à la température ambiante ;
- utiliser un système de mesure ayant une grande sensibilité en raison des faibles signaux délivrés par le capteur, de l'ordre de  $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  à  $60 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

## 13.2 Capteurs d'humidité de l'air

Les principaux hygromètres utilisés pour la caractérisation des enceintes sont :

- les hygromètres à condensation ;
- les psychromètres ;
- les hygromètres à variation d'impédance.

NOTE Il est utile de préciser que les caractéristiques métrologiques des capteurs d'humidité sont variables en fonction de la technologie de ces derniers et que l'utilisateur doit prendre garde à ce que l'incertitude des capteurs ne dégrade pas de façon inacceptable le résultat de la caractérisation.

Un exemple est donné en Annexe B.

### 13.2.1 Hygromètre à condensation (voir norme NF X 15-112)

Il permet de couvrir, selon le modèle et les conditions de mesure, une plage de température de gelée ou de rosée de  $-90 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $+100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Deux types de sonde peuvent être utilisés :

- sonde non chauffée : elle est placée directement à l'intérieur de l'espace de travail ;
- sonde chauffée : un prélèvement est réalisé par l'intermédiaire d'une canne reliée au capteur qui se trouve à l'extérieur de l'enceinte. L'ensemble est chauffé à une température supérieure à la température de rosée de l'air prélevée dans l'enceinte.

Les instruments doivent être utilisés en tenant compte des grandeurs d'influence ci-après :

- phénomènes thermiques ;
- propreté du condensat ;
- débit d'air ;
- propreté du miroir ;
- détection optique ;
- présence de produits condensables dans l'enceinte, autre que la vapeur d'eau.

### 13.2.2 Psychromètre (voir norme NF X 15-118)

Il mesure la température «sèche» et la température «humide». Il permet de couvrir, selon le modèle et les conditions de mesure, une plage de température sèche de 0 °C à + 100 °C.

Les instruments doivent être utilisés en tenant compte des grandeurs d'influence ci-après :

- vitesse de ventilation des thermomètres ;
- nature et qualité du manchon ;
- qualité et température de l'eau ;
- pression régnant dans l'enceinte.

### 13.2.3 Hygromètre à variation d'impédance (voir norme NF X 15-113)

Il mesure directement l'humidité relative pour des valeurs supérieures à 5 % et inférieures à 100 %. Les températures minimales sont environ de – 20 °C ; les températures maximales de l'ordre de + 100 °C.

Deux types d'hygromètres existent :

- hygromètres capacitifs ;
- hygromètres résistifs.

Les instruments doivent être utilisés en tenant compte des grandeurs d'influence ci-après :

- pollution ;
- variation de température ;
- effort mécanique ;
- effet de la condensation ;
- hystérésis.

## 13.3 Capteurs de mesure de l'effet du rayonnement des parois

Le thermomètre à globe noir est décrit de façon détaillée dans la norme NF EN ISO 7726.

## 13.4 Capteurs de mesure de la vitesse de l'air

La mesure est effectuée avec un capteur omnidirectionnel en prenant les précautions suivantes :

- si le capteur est compensé en température, noter l'écart entre la température de mesure et la température d'étalonnage ;
- si le capteur n'est pas compensé en température, effectuer la mesure uniquement à la température d'étalonnage.

La mesure est effectuée à la pression atmosphérique.

Toute mesure effectuée avec un autre type de capteur impose d'orienter ce dernier afin de rechercher à relever la vitesse maximale.

## 14 Incertitude de mesure

Par convention et sauf spécifications particulières, les incertitudes élargies  $U$  sont déterminées à partir des incertitudes types composées avec un facteur d'élargissement.

### 14.1 Étalonnage des chaînes de mesure

Les chaînes de mesure doivent faire l'objet d'un étalonnage dont le raccordement aux étalons nationaux est assuré. De plus, cet étalonnage doit être réalisé aux gammes de température et d'humidité relative qui correspondent à celles des conditions d'essai. L'étalonnage permet de connaître la correction à appliquer aux valeurs lues.

L'incertitude de mesure des chaînes de mesure doit être déterminée conformément aux règles de calcul des incertitudes défini dans la norme expérimentale NF ENV 13005.

NOTE Des précautions suivantes doivent être prises selon l'hygromètre utilisé, à savoir :

- hygromètre à condensation : il doit être étalonné dans les mêmes gammes de température de rosée que celles qui font l'objet de la condition d'essai ;
- psychromètre : il doit être étalonné aux valeurs de température et dans la gamme d'humidité relative identiques à celles qui font l'objet de la condition d'essai. Il est nécessaire de connaître la valeur de la pression atmosphérique du lieu de la mesure pour déterminer la température de rosée ;
- hygromètre à variation d'impédance : il doit être étalonné aux valeurs de température dans la gamme d'humidité relative identiques à celles qui font l'objet de la condition d'essai.

Pour chaque méthode, un exemple de calcul de l'incertitude sur la détermination de l'humidité relative est donné en Annexe B.

### 14.2 Incertitude associées aux paramètres et à la valeur $x_{\text{air}}$

Une proposition de formulation des incertitudes associées aux paramètres et à la valeur  $x_{\text{air}}$  des paramètres mesurés est présentée en Annexe D.

## 15 Vérification d'une enceinte

### 15.1 Généralités

La vérification a pour objet de comparer les résultats obtenus lors de la caractérisation avec des spécifications de l'enceinte et de conclure quant à la conformité ou à la non-conformité de l'enceinte pour chacune des spécifications.

Les spécifications ou exigences spécifiées, peuvent porter sur les paramètres suivants ( $x_{\text{air}}$ ) :

- température de l'air ;
- humidité relative de l'air ;
- vitesse de variation en température ;
- vitesse de l'air ;
- effet du rayonnement des parois ;
- temps de récupération.

Ces spécifications doivent répondre à des protocoles (normes, recommandations ou domaines spécifiques) et doivent être exprimées sous la forme d'EMT (voir définition 3.24).

## 15.2 Règles de conformité

Pour qu'une enceinte soit déclarée conforme, il faut que, pour chaque paramètre spécifié, la moyenne de tous les mesurages  $x_{mj}$  de chaque capteur et son incertitude élargie  $U_{mj}$  associée appartiennent à l'intervalle des EMT situé autour de la valeur spécifiée (voir Figure 9).

$$\forall j = 1, \dots, N : (x_{mj} \pm U_{mj}) \in [x_{co} - EMT_{\min} ; x_{co} + EMT_{\max}]$$

L'écart  $\Delta x_{co}$  constaté entre la valeur  $x_{air}$  d'un paramètre de l'enceinte et la condition désirée  $x_{co}$  de ce paramètre est pris en compte quand il est significatif, en particulier si  $|x_{air} - x_{co}| > U$ .

La réduction de cet écart est effectuée en ajustant la valeur de consigne.

Dans le cadre d'une vérification, le temps de récupération est le temps mis pour le retour dans les EMT, en régime établi.

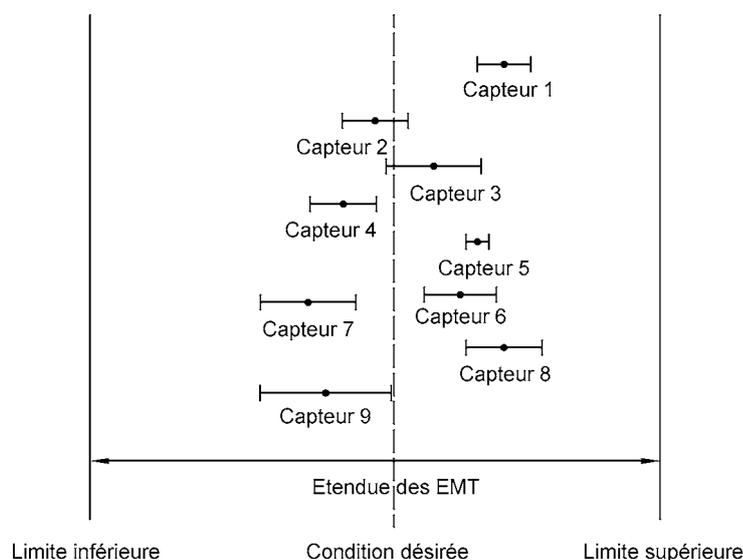


Figure 9 — Exemple : Enceinte conforme

## 15.3 Incertitudes associées aux paramètres et à la valeur $x_{air}$

Les règles définies au paragraphe 15.2 s'appliquent également pour une vérification.

## 15.4 Jugement

À l'issue de la vérification, un jugement est porté sur la conformité de l'enceinte.

L'enceinte est déclarée :

— conforme pour toutes les spécifications.

La règle de conformité (paragraphe 15.2) est respectée pour tous les paramètres et valeurs spécifiés de l'espace de travail défini lors de la mise en place des capteurs.

— conforme après décalage de la valeur de consigne.

La règle de conformité (paragraphe 15.2) est respectée pour tous les paramètres et valeurs spécifiés de l'espace de travail défini lors de la mise en place des capteurs, mais une correction des valeurs de consignes doit être effectuée systématiquement lors de l'utilisation de l'enceinte.

Les valeurs de correction doivent être validées par une nouvelle vérification.

— conforme pour certaines spécifications et non conforme pour d'autres

La règle de conformité (paragraphe 15.2) n'est pas respectée pour certains des paramètres et valeurs spécifiés (par exemple pour une température donnée).

— non conforme

La règle de conformité (paragraphe 15.2) n'est pas respectée pour l'ensemble des paramètres et valeurs spécifiés de l'espace de travail.

Les non-conformités doivent être signalées à l'utilisateur, qui décidera éventuellement des actions à mener sur l'enceinte : réduction de l'espace travail, ajustage, réparation, réforme de l'enceinte.

Un constat de vérification doit être émis conformément au fascicule de documentation X 07-011.

## 16 Rapport d'essai

Dans le cadre d'une caractérisation, le rapport d'essai doit comporter au minimum :

- l'identification de l'enceinte ;
- identification du demandeur ;
- la date de l'opération ;
- l'identification de l'intervenant ayant réalisé la caractérisation ;
- la référence au présent document ;
- la référence à la procédure de caractérisation utilisée ;
- tous les résultats de mesure traités ;
- les références du raccordement des moyens de mesure ;
- l'incertitude des moyens de mesure ;
- l'état des réglages effectués (position des pièces mobiles, offset, décalage de la valeur de consigne, ...).

Dans le cas du constat de vérification, le document doit également comporter les mentions suivantes :

- la référence au document contenant les critères d'acceptation ;
- les écarts hors limites d'erreurs maximales tolérées des points vérifiés avant et après ajustage ;
- le jugement.

**Annexe A**  
(informative)

**Exemple de calcul d'écart maximal obtenu  
sur la valeur de l'humidité relative en fonction  
de différentes EMT sur la température**

Les valeurs de températures de rosée restent constantes.

Notations utilisées :

$\theta$  température ;

$\theta_d$  température de rosée ;

$U_w$  humidité relative.

**$U_w = 20\%$**

$\theta$ (°C)	$\theta_d$ (°C)	Écart sur l'humidité relative (%) en fonction des EMT sur la température			
		$\pm 0,1$ °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 1$ °C
0	-20,30	0,3	0,6	1,5	2,9
10	-11,95	0,3	0,5	1,4	2,7
20	-3,60	0,3	0,5	1,3	2,5
30	4,60	0,2	0,5	1,2	2,3
40	12,80	0,2	0,4	1,1	2,1
50	20,90	0,2	0,4	1,0	1,9
60	28,90	0,2	0,4	1,0	1,8
70	36,90	0,2	0,3	0,9	1,7
80	44,80	0,2	0,3	0,8	1,7
90	52,60	0,1	0,3	0,8	1,5
100	60,40	0,1	0,3	0,7	1,5

**$U_w = 50 \%$** 

$\theta$ (°C)	$\theta_d$ (°C)	Écart sur l'humidité relative (%) en fonction des EMT sur la température			
		$\pm 0,1 \text{ °C}$	$\pm 0,2 \text{ °C}$	$\pm 0,5 \text{ °C}$	$\pm 1 \text{ °C}$
0	-9,17	0,7	1,5	3,6	7,2
10	0,07	0,7	1,3	3,3	6,7
20	9,27	0,6	1,2	3,1	6,2
30	18,45	0,6	1,2	2,9	5,8
40	27,60	0,5	1,1	2,7	5,3
50	36,70	0,5	1,0	2,5	5,0
60	45,75	0,4	1,0	2,3	4,7
70	54,80	0,5	0,9	2,1	4,4
80	63,80	0,5	0,8	2,1	4,0
90	72,75	0,4	0,8	1,9	3,8
100	81,65	0,3	0,7	1,9	3,6

 **$U_w = 80 \%$** 

$\theta$ (°C)	$\theta_d$ (°C)	Écart sur l'humidité relative (%) en fonction des EMT sur la température			
		$\pm 0,1 \text{ °C}$	$\pm 0,2 \text{ °C}$	$\pm 0,5 \text{ °C}$	$\pm 1 \text{ °C}$
0	-3,04	1,1	2,3	5,8	11,6
10	6,72	1,1	2,1	5,4	10,7
20	16,45	1,0	2,0	4,9	9,9
30	26,16	0,9	1,9	4,6	9,2
40	35,87	0,9	1,7	4,2	8,6
50	45,57	0,8	1,6	4,0	8,0
60	55,25	0,7	1,5	3,8	7,4
70	64,93	0,7	1,4	3,5	7,0
80	74,60	0,7	1,3	3,3	6,5
90	81,21	0,6	1,2	3,1	6,0
100	93,86	0,6	1,2	2,8	5,7

Les EMT choisies dans les exemples représentent des tolérances sur les valeurs d'homogénéité qui peuvent être exigées sur la température par des normes ou des spécifications.

Il est important de s'assurer que les tolérances demandées sur l'humidité relative soient supérieures aux valeurs calculées dans les tableaux ci-dessus.

EXEMPLE Valeurs spécifiées :

$$\theta = 20 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C} \text{ et } U_w = 50 \% \pm 2 \%$$

La valeur de l'écart maximal sur l'humidité relative obtenue par le calcul est égale à 6,2 %, soit  $\pm 3,1 \%$ , ce qui n'est pas compatible avec la spécification.

## Annexe B (informative)

### Détermination de l'incertitude de mesure de l'humidité relative Comparaison à titre d'exemple entre trois méthodes de détermination de l'humidité relative en un point de l'espace de travail

Pour illustrer l'évaluation de l'incertitude de mesure en humidité relative ( $U_w$ ) aux différents points de mesure de températures ( $\theta$ ) de l'espace de travail d'une enceinte climatique, il a été choisi, à titre d'exemple, deux valeurs d'incertitude pour chaque méthode utilisée :

- hygromètre à condensation (mesure de la température de rosée  $\theta_d$ ) ;
  - incertitude de mesure : 0,2 °C et 0,4 °C (facteur d'élargissement  $k = 2$ ) ;
- psychromètre (mesure de la température humide  $\theta_w$ ) ;
  - incertitude de mesure : 0,2 °C et 0,4 °C (facteur d'élargissement  $k = 2$ ) ;
- hygromètre à variation d'impédance (mesure de l'humidité relative  $U_w$ ) :
  - incertitude de mesure : 2 % et 4 % (facteur d'élargissement  $k = 2$ ) ;
- sonde de température :  $\theta$  :
  - incertitude de mesure : 0,2 °C et 0,4 °C (facteur d'élargissement  $k = 2$ ).

Les calculs de l'incertitude sur l'humidité relative, obtenue à partir de la méthode B (psychromètre), sont réalisés en tenant compte de la pression mesurée dans l'enceinte climatique avec un instrument étalonné et dont l'incertitude est connue. Dans l'exemple, l'incertitude de mesure est égale à : 200 Pa et 400 Pa (facteur d'élargissement  $k = 2$ ).

Dans le cas où la pression n'est pas prise en compte dans le calcul de  $U_w$ , l'erreur de mesure commise est directement fonction de l'écart entre la valeur réelle de la pression et celle utilisée dans la formule du psychromètre (généralement 100 000 Pa ou 101 325 Pa) (voir NF X 15-118, Tableau 2, page 12).

#### EXEMPLE

- température : + 20 °C ;
- humidité relative : 40 % ;
- pression réelle : 90 000 Pa ;
- pression utilisée : 101 325 Pa.

Écart maximal constaté, lors du calcul de  $U_w$  : + 2,5 %.

Les tableaux, ci-après, donnent le résultat final du calcul de la valeur de l'incertitude élargie (exprimée en % de  $U_w$ ) sur la détermination de l'humidité relative, (avec un facteur d'élargissement  $k = 2$ ).

Pour les calculs d'incertitude, les covariances sont supposées nulles :

hygromètre à condensation

$$u^2(U_w) = \left( \frac{\partial U_w}{\partial \theta_d} \right)^2 \times u^2(\theta_d) + \left( \frac{\partial U_w}{\partial \theta} \right)^2 \times u^2(\theta)$$

psychromètre

$$u^2(U_w) = \left( \frac{\partial U_w}{\partial \theta_w} \right)^2 \times u^2(\theta_w) + \left( \frac{\partial U_w}{\partial \theta} \right)^2 \times u^2(\theta) + \left( \frac{\partial U_w}{\partial p} \right)^2 \times u^2(p)$$

hygromètre à variation d'impédance

$$u^2(U_w) = \left( \frac{\partial U_w}{\partial U_{wm}} \right)^2 \times u^2(U_{wm}) + \left( \frac{U_w}{\partial \theta_m} \right)^2 \times u^2(\theta_m) + \left( \frac{\partial U_w}{\partial \theta} \right)^2 \times u^2(\theta)$$

où

$p$  est la pression ;

$u^2$  est la variance estimée ;

$\theta_m$  et  $U_{wm}$  sont les valeurs mesurées par l'hygromètre à variation d'impédance.

Hygromètre à condensation								
$\theta \backslash U_w$	20 %		40 %		60 %		90 %	
15 °C					1,1	2,3	1,7	3,3
25 °C	0,4	0,8	0,7	1,4	1,0	2,1	1,5	3,1
60 °C	0,3	0,6	0,6	1,1	0,8	1,6	1,2	2,4
80 °C	0,3	0,5	0,5	1,0	0,7	1,4	1,1	2,1

Psychromètre								
$\theta \backslash U_w$	20 %		40 %		60 %		90 %	
15 °C					2,4	4,8	2,8	5,6
25 °C	1,2	2,4	1,5	3,0	1,7	3,5	2,2	4,3
60 °C	0,5	0,9	0,7	1,4	0,9	1,9	1,3	2,6
80 °C	0,3	0,7	0,6	1,1	0,8	1,5	1,1	2,2

Hygromètre à variation d'impédance								
$\theta \backslash U_w$	20 %		40 %		60 %		90 %	
15 °C					2,3	4,6	2,6	5,2
25 °C	2,0	4,1	2,1	4,2	2,3	4,5	2,5	5,0
60 °C	2,0	4,0	2,1	4,2	2,2	4,3	2,3	4,7
80 °C	2,0	4,0	2,1	4,1	2,1	4,2	2,3	4,5

NOTE Les tableaux sont présentés, pour chaque valeur d'humidité relative, avec deux colonnes correspondant aux incertitudes des différentes méthodes de mesure utilisées.

## Annexe C (informative)

### Détermination du régime établi par une méthode statistique

Lorsqu'il n'existe pas de cause de perturbation autre qu'une perturbation initiale, le régime est dit établi dès que l'on observe que la dispersion et la moyenne du paramètre étudié ne varient pas significativement en fonction du temps.

Les développements et les justifications théoriques ont été volontairement réduits à leur plus simple expression pour conserver à cette proposition la clarté nécessaire.

#### Contenu du test

L'enregistrement est divisé en intervalles de temps égaux, indicés  $i$  en partant de  $i = 1$ .

Pendant chaque intervalle de temps, la température prend une infinité de valeurs. Elle peut être caractérisée par sa moyenne  $m_i$  et sa variance  $\sigma_i^2$ .

30 mesures successives de température sont réalisées pendant chaque intervalle de temps. Ces mesures constituent un échantillon qui est utilisé pour estimer la moyenne  $m_i$  et la variance  $\sigma_i^2$ .

Notations utilisées :

—  $m_i$  moyenne «vraie» de la température pendant l'intervalle de temps  $i$  ;

—  $\sigma_i^2$  variance «vraie» de la température pendant l'intervalle de temps  $i$  ;

—  $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{30} x_{ik}$  estimateur de la moyenne  $m_i$  ;

—  $s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{30} (x_{ik} - \bar{x}_i)^2$  estimateur de la variance  $\sigma_i^2$  ;

—  $\sigma_{\text{capteur}}^2$  variance connue du capteur et de la chaîne de mesure (dans des conditions de répétabilité) associée à une série de résultats de mesure.

Le test consiste à vérifier une succession d'hypothèses, pour un niveau de confiance de 95 %, et pour chaque intervalle de temps.

**Hypothèse A** : le paramètre étudié est plus stable que la chaîne de mesure,  $\sigma_i^2 \leq \sigma_{\text{capteur}}^2$

Ce cas peut se rencontrer lorsque la résolution de l'instrumentation est insuffisante.

— si  $s_i^2 \leq 1,47 \sigma_{\text{capteur}}^2$ , l'hypothèse A est acceptée.

La situation est traitée dans le cas 1

— si  $s_i^2 > 1,47 \sigma_{\text{capteur}}^2$ , l'hypothèse A est rejetée.

La situation est traitée dans le cas 2.

Par souci de simplification, on admet que la conclusion du test pour l'intervalle de temps ( $i$ ) est aussi vraie pour l'intervalle de temps ( $i + 1$ ).

**Cas 1** : test dans le cas d'un paramètre étudié plus stable que la chaîne de mesure utilisée.

Dans ce cas, il n'est pas utile de tester l'égalité des variances estimées des intervalles de temps successifs puisqu'elles sont égales par hypothèse. Le test est limité à la vérification de l'égalité des moyennes.

**Hypothèse B** : les deux moyennes successives sont égales,  $m + 1 = m_i$

$$\text{Si } \left| \bar{x}_i - \bar{x}_{i+1} \right| > 1,96 \sqrt{2 \frac{\sigma_{\text{capteur}}^2}{30}}, \text{ l'hypothèse B est rejetée.}$$

Les moyennes successives ne sont pas égales : le régime établi n'est pas atteint. Le test doit être recommencé pour l'intervalle de temps (i + 1) à partir de l'hypothèse A.

$$\text{Si } \left| \bar{x}_i - \bar{x}_{i+1} \right| \leq 1,96 \sqrt{2 \frac{\sigma_{\text{capteur}}^2}{30}}, \text{ l'hypothèse B est acceptée.}$$

Le capteur considéré est en régime établi. Le test est terminé pour ce capteur.

**Cas 2** : test dans le cas d'un paramètre étudié moins stable que la chaîne de mesure utilisée.

C'est le cas général.

Le test est composé :

- d'un test d'égalité des variances (hypothèse C) ;
- d'un test d'égalité des moyennes pour les intervalles de temps (i) et (i + 1) (hypothèse D).

**Hypothèse C** : les variances successives sont égales,  $\sigma_{i+1}^2 = \sigma_i^2$

$$\text{Si } \max \left( \frac{s_i^2}{s_{i+1}^2}, \frac{s_{i+1}^2}{s_i^2} \right) > 2,1 : \text{ l'hypothèse C est rejetée.}$$

Le régime établi n'est pas atteint.

Le test doit être recommencé pour l'intervalle de temps (i + 1) à partir de l'hypothèse A.

$$\text{Si } \max \left( \frac{s_i^2}{s_{i+1}^2}, \frac{s_{i+1}^2}{s_i^2} \right) \leq 2,1 : \text{ l'hypothèse C est acceptée.}$$

L'hypothèse d'égalité des moyennes doit être vérifiée.

**Hypothèse D** : les moyennes successives sont égales,  $m_{i+1} = m_i$

$$\text{Si } \left| \bar{x}_i - \bar{x}_{i+1} \right| > 2 \sqrt{\frac{s_i^2 + s_{i+1}^2}{30}}, \text{ l'hypothèse D est rejetée.}$$

Les moyennes successives ne sont pas égales. Le régime établi n'est pas atteint. Le test doit être recommencé pour l'intervalle de temps (i + 1) à partir de l'hypothèse A.

$$\text{Si } \left| \bar{x}_i - \bar{x}_{i+1} \right| \leq 2 \sqrt{\frac{s_i^2 + s_{i+1}^2}{30}}, \text{ l'hypothèse D est acceptée.}$$

Le capteur considéré est en régime établi. Le test est terminé pour ce capteur.

Le test est complètement terminé lorsque tous les capteurs utilisés pour la caractérisation de l'enceinte sont déclarés en régime établi.

## Annexe D

### (informative)

### Calcul de l'incertitude

#### D.1 Calcul de l'incertitude associée aux paramètres pour chaque capteur de l'espace de travail

##### D.1.1 Généralités

Il s'agit dans la suite de cette annexe d'estimer les différentes incertitudes de mesure définies dans le corps du présent document.

La démarche est applicable pour l'évaluation des incertitudes relatives aux capteurs de température ou d'humidité.

Le terme « valeur », utilisé dans la suite du texte de cette annexe, sera associée à la température, l'humidité ou à tout autre paramètre caractérisé.

Par hypothèse, on suppose que les différentes composantes de l'incertitude type composée sont considérées comme indépendantes.

Par convention et sauf spécifications particulières, les incertitudes élargies  $U$  sont déterminées à partir des incertitudes types composées avec un facteur d'élargissement  $k = 2$ .

##### D.1.2 Calcul de l'incertitude associée à la valeur moyenne $x_{mj}$ pour chaque capteur

Dans la phase où le régime établi est atteint, il est relevé  $n$  valeurs sur une durée  $\Delta t$  pour chacun des  $N$  capteurs.

###### D.1.2.1 Calcul de l'incertitude associée à la valeur moyenne du capteur $j$

Seules les composantes, considérées comme non négligeables, sont prises en compte dans les calculs ci-après :

— répétabilité

Les mesures sont obtenues par une acquisition en continue, ce qui suppose qu'elles ne sont pas indépendantes (par hypothèse totalement corrélées). Par conséquent, la répétabilité est estimée par l'écart type expérimental ( $s_j$ ) et non pas l'écart type sur la moyenne ( $s_j/\sqrt{n}$ ).

— écart type expérimental  $s_j$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - x_{mj})^2}$$

où

$x_{mj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji}$  moyenne des  $n$  mesures du  $j$  ième capteur ;

$x_{ji}$  valeur de la  $i$ ème mesure du  $j$  ième capteur ;

$n$  nombre de mesures ;

$s_j$  traduit les variations du paramètre mesuré par le  $j$  ième capteur pendant la durée des mesures  $\Delta t$  ;

NOTE Il existe d'autres méthodes de détermination de tous les paramètres recherchés (par exemple : à partir de l'étendue). Les incertitudes élargies doivent être exprimées pour une probabilité de 95 % afin d'être comparables.

— incertitude composée  $u_{cj}$  d'un capteur de la chaîne de mesure.

La chaîne de mesure comprend le capteur, son convertisseur, son afficheur et les accessoires.

Cette incertitude prend en compte l'étalonnage, la dérive, la résolution, etc. (voir document COFRAC 2066).

L'incertitude-type composée  $u_{mj}$  est estimée par :

$$u_{mj} = \sqrt{s_j^2 + u_{cj}^2}$$

L'incertitude élargie  $U_{mj}$  est estimée par :

$$U_{mj} = k\sqrt{s_j^2 + u_{cj}^2}$$

## D.2 Calcul de l'incertitude associée à la valeur $x_{air}$ des paramètres mesurés dans l'espace de travail

### D.2.1 Composantes de l'incertitude élargie

Seules les composantes, considérées comme non négligeables, sont prises en compte dans les calculs ci-après :

— Incertitude-type composée  $u_c$  de la chaîne de mesure :

$$u_c = \max(u_{cj})$$

— reproductibilité ;

— écart-type de répétabilité  $s_r$ .

Lorsque les écarts types  $s_j$  ne sont pas significativement différents, l'écart type de répétabilité est estimé suivant les directives de la norme NF ISO 5725-2.

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2}$$

où

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - x_{mj})^2}$$
 est l'écart type expérimental ;

$$x_{mj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji}$$
 est la moyenne des n mesures du j ième capteur ;

$x_{ji}$  est la valeur de la i ième mesure du j ième capteur ;

$n$  est le nombre de mesures ;

$N$  est le nombre de capteurs.

Dans le cas où les dispersions sont significativement différentes entre les capteurs,  $s_r$  devient :

$$s_r = \max(s_j)$$

— écart type de reproductibilité  $s_R$

Il caractérise l'hétérogénéité spatio-temporelle de l'enceinte et est estimé suivant les directives de la norme NF ISO 5725-2.

$$s_R = \sqrt{s_r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{mj} - x_{air})^2}$$

où

$$x_{air} = \frac{1}{N \times n} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad \text{moyenne de l'ensemble des mesures (moyenne générale) ;}$$

$N$  est le nombre de capteurs ;

$n$  est le nombre de mesures.

## D.2.2 Incertitude élargie associée à la moyenne générale

Pour les  $n$  mesures des  $N$  capteurs, cette incertitude est déterminée de la façon suivante :

$$U = k \sqrt{s_R^2 + u_c^2}$$

## Annexe E (informative)

### Variation de température contrôlée

La caractérisation de la variation de température contrôlée consiste à déterminer entre deux paliers et à une fréquence prédéterminées les vitesses instantanées (voir Figure E.1).

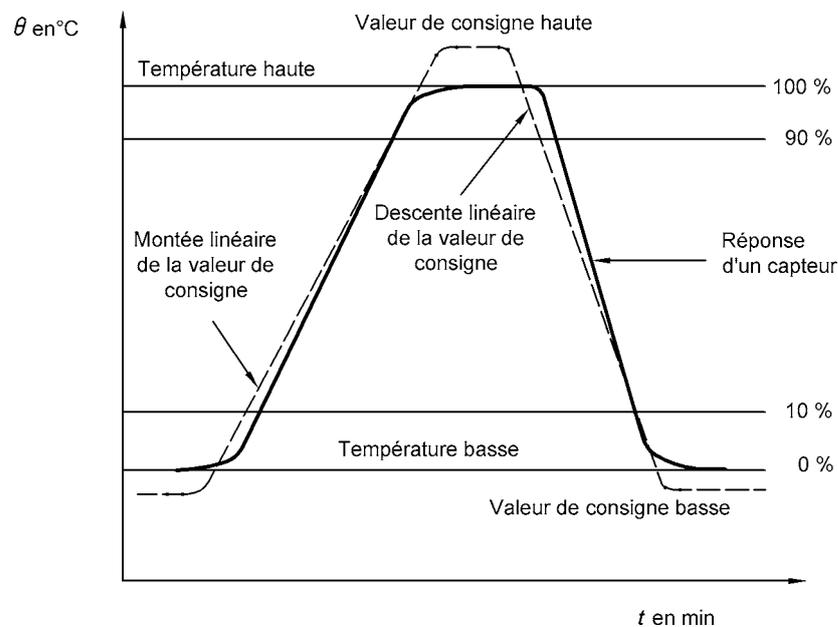
Ce type de caractérisation est évoqué dans la présente annexe dans le but d'attirer l'attention du demandeur sur les spécificités qu'une telle prestation impose.

En effet, la caractérisation passe par la détermination des vitesses de variation instantanées  $v_i$  qui, selon les publications d'essais, peuvent être tolérancées de  $\pm 20\%$  jusqu'à  $\pm 50\%$ .

Ces tolérances s'appliquent dans le cas de variations à caractère lent. Pour des variations à caractère rapide, elles peuvent en revanche s'avérer insuffisantes, voire inadaptées.

En conséquence, il est préférable que ce type de caractérisation fasse l'objet d'une concertation entre parties afin qu'une bonne interprétation des résultats soit possible.

Il est recommandé de faire l'évaluation entre 10 % et 90 % de l'échelon de température.



**Figure E.1 — Variation de température contrôlée dans l'espace de travail**

## Bibliographie

- [1] FD X 07-021, *Normes fondamentales – Métrologie et applications de la statistique – Aide à la démarche pour l'estimation de l'incertitude des mesures et résultats d'essais.*
- [2] NF X 15-111, *Mesure de l'humidité de l'air – Généralités sur les instruments de mesure – Guide de choix et d'utilisation.*
- [3] NF EN 60068-2-14, *Essais d'environnement – Partie 2-14 : essais – Essai N : variation de température (indice de classement : C 20-714).*
- [4] NF EN 60068-3-5, *Essais d'environnement – Partie 3-5 : documentation d'accompagnement et guide – Confirmation des performances des chambres d'essai en température (indice de classement : C 20-403-5).*
- [5] NF EN 60068-3-6, *Essais d'environnement – Partie 3-6 : documentation d'accompagnement et guide – Confirmation des performances des chambres d'essais en température et humidité (indice de classement : C 20-403-6).*
- [6] NF EN 60068-3-7, *Essais d'environnement – Partie 3-7 : documentation d'accompagnement et guide – Mesures dans les chambres d'essai en température pour les essais A et B (avec charge) (indice de classement : C 20-403-7).*
- [7] NF EN 60068-3-11, *Essais d'environnement – Partie 3-11 : documentation d'accompagnement et guide – Calcul de l'incertitude des conditions en chambres d'essais climatiques.*
- [8] RE. Aéro 681 01, *Caractérisation des enceintes climatiques.*
- [9] *Dictionnaire des Industries* édité par le Conseil International de la Langue Française (1986).
- [10] Document COFRAC 2066 : *Exigences spécifiques de la CPA Température.*
- [11] Norme UTE – C 00-230, *Tensions normales de 1ère catégorie des réseaux de distribution d'énergie électrique. Arrêté ministériel du 29 mai 1986.*