

Modélisation thermodynamique prédictive de l'environnement induit à l'intérieur d'abris de stockage.

Bénédicte BAQUÉ^{1*}, Clémence GONÇALVÈS¹, Serge LE VILAIN¹, Laurent CAZENAVE¹, Thierry MAROT¹

¹DGA Maîtrise de l'Information
BP 7 - 35998 RENNES CEDEX 9

* (auteur correspondant : benedicte.baque@intradef.gouv.fr)

Résumé – Dans le processus d'acquisition des matériels destinés à équiper les forces, le département Cycle de Vie Opérationnel (CVO) est responsable de l'élaboration des spécifications en environnement climatique et mécanique de munitions complexes. L'obtention au meilleur coût des performances requises pour ces systèmes est un enjeu majeur. Dans ce cadre, la démarche de personnalisation conduit à caractériser les environnements réellement subis par les systèmes plutôt qu'à appliquer des normes forfaitaires. Concernant l'environnement climatique, l'un des objectifs du département CVO est la détermination de la température subie par des matériels en situation d'attente ou de stockage dans des abris fermés (environnement induit). Ce paramètre influence directement la mise en œuvre opérationnelle ainsi que le vieillissement des matériels. La problématique est donc double : disposer d'un modèle physique représentatif des abris de stockage et disposer de données météorologiques fiables comme paramètres d'entrée de la simulation, pour obtenir des données de sortie dont la précision soit compatible des exigences opérationnelles.

Dans ce contexte, le département CVO a développé un modèle thermodynamique « Thermody », défini à partir des phénomènes physiques de transmission de chaleur et associé à une base de données de mesures in-situ. Ce modèle permet d'estimer la température induite (à l'intérieur d'un abri de stockage) en fonction des données météorologiques extérieures. La méthode consiste à identifier les paramètres caractéristiques pour un abri de stockage donné, à partir des entrées météorologiques et géométriques, en comparant les températures induites estimées aux conditions induites réellement mesurées. Cette étape comprend une phase de paramétrage et une phase de validation du modèle.

Cependant, cette caractérisation d'un abri de stockage est réalisée pour un site particulier (le plus souvent en France métropolitaine) et pour une période de mesures donnée. L'enjeu consiste donc à appliquer les paramètres précédemment identifiés à des abris de stockage de même type en usage à travers le globe et d'estimer, avec une incertitude tolérée, leur environnement induit à partir des conditions météorologiques extérieures. Cette étape constitue les phases d'exploitation et d'estimation de l'environnement induit.

Ce texte détaille la démarche suivie pour la caractérisation thermique d'un abri de stockage donné, depuis le paramétrage du modèle thermodynamique, jusqu'à l'estimation de la température induite en fonction de conditions météorologiques extérieures, dans une autre zone climatique du globe.

Nomenclature

c	capacité thermique massique, $J/kg/K$
C	constante
e	épaisseur, m
h	coeff. d'échange thermique, $W/m^2/K$
N	nombre de plaques
P	puissance, W
S	surface d'échange, m^2
t	temps, s
T	température, K
V	vitesse du vent, m/s

Symboles grecs

α	absorptivité
ε	émissivité
κ	capacité thermique volumique, $J/m^3/K$
λ	conductivité thermique, $W/m/K$
ρ	masse volumique, kg/m^3

σ	constante de Stefan-Boltzmann, $W/m^2/K^4$
φ	densité de flux thermique, W/m^2

Indices et exposants

<i>ciel</i>	ciel
<i>cond</i>	conduction
<i>conv</i>	convection
<i>éq</i>	équivalent
<i>ext</i>	extérieur
<i>int</i>	intérieur
<i>j</i>	indice de plaque
<i>n</i>	indice de pas de temps
<i>nat</i>	naturel
<i>p</i>	paroi
<i>ray</i>	rayonnement
<i>solaire</i>	solaire

1. Introduction

Au sein de la DGA, le département CVO est chargé de rédiger les spécifications en environnement climatique et mécanique de munitions complexes. Après avoir établi le profil de vie d'un tel système et précisé chacune des situations qu'il est susceptible de vivre, les contraintes climatiques et mécaniques sont quantifiées.

Pour la partie qui traite de l'environnement climatique en situation de stockage, les spécifications distinguent deux types de configurations. Dans le premier cas, le matériel est à ciel ouvert et les valeurs fournies dans la spécification sont les conditions météorologiques en entrée du système considéré : soit issues de normes pour des objectifs d'interopérabilité, soit fournies par des organismes météorologiques. Dans le deuxième cas, le matériel est stocké sous divers types d'abris (abris légers, abris lourds, hangarées) et il n'existe pas de données forfaitaires qui définissent l'environnement induit pour un abri de stockage donné.

Or, la prise en compte de l'environnement et de ses effets pour une munition complexe est un enjeu important en termes de performances, de fiabilité, de disponibilité et de contraintes opérationnelles. Pour ces raisons, la détermination des contraintes d'environnement réel sur un matériel est recommandée, à travers la démarche dite de personnalisation. De plus, les enjeux financiers attachés à la durée d'emploi de tels systèmes conduisent usuellement à devoir quantifier l'environnement réellement vécu par le matériel au cours de sa vie, afin de pouvoir estimer son vieillissement effectif.

2. Modélisation d'abris de stockage : le modèle « Thermody »

La modélisation thermodynamique d'abris de stockage a pour objet de traduire les conditions météorologiques extérieures en conditions induites applicables en entrée de systèmes de type munitions complexes. L'outil « Thermody » a été développé en interne sous Excel, pour la caractérisation thermique d'abris de stockage. La modélisation consiste en un bilan énergétique, ajustée par les mesures des températures de surface interne $T_{p\ int}$ et externe $T_{p\ ext}$ des parois de l'abri, comme schématisé sur la Figure 1. Les transferts de chaleur avec le sol ne sont pour l'instant pas pris en compte dans le modèle.

Les simulations exploitent les données des organismes météorologiques, classiquement sur 15 ou 30 ans. Les excitations météorologiques en entrée du modèle sont volontairement limitées à la température extérieure T_{ext} , la densité de flux solaire total et la vitesse du vent V , qui sont des grandeurs observables. En effet, ses données pourront d'une part contribuer au recalage et à la validation du modèle thermodynamique, et seront d'autre part accessibles pour une exploitation du paramétrage en d'autres lieux du globe. La donnée de sortie est la température équivalente T_{int} supposée constante à l'intérieur de l'abri.

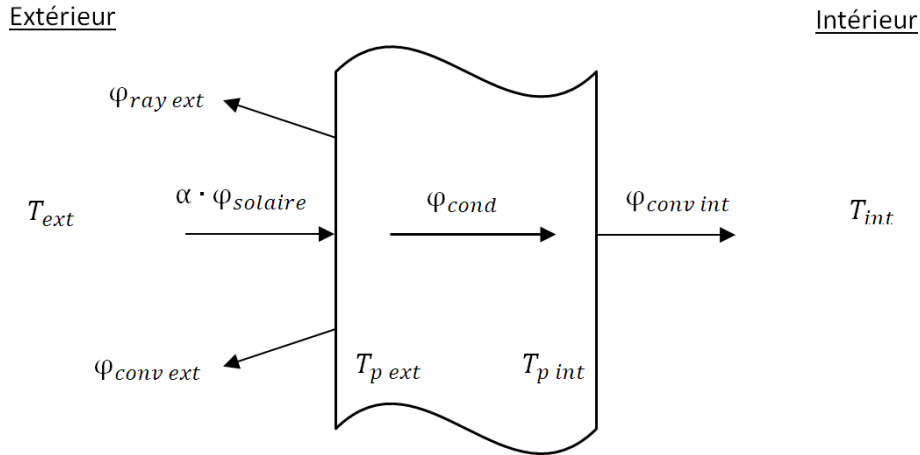


Figure 1 : Bilan énergétique à travers une paroi de l'abri.

Les modes de transfert de chaleur considérés sont les suivants [1] :

- absorption d'une fraction $\alpha \cdot \varphi_{solaire}$ de la densité de flux solaire incident $\varphi_{solaire}$

Sur chaque surface externe de l'abri, la densité de flux solaire incident $\varphi_{solaire}$ est déterminée par projection de la densité de flux solaire total mesurée, grâce à un calcul astronomique (l'azimut et l'élévation dépendent du lieu et de la date). L'absorptivité α supposée constante pour un matériau est initialisée avec une valeur issue de la littérature, puis affinée grâce à une étude de sensibilité du modèle.

- rayonnement vers un ciel clair de température T_{ciel} [2], tel que :

$$\varphi_{ray\ ext} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{p\ ext}^4 - T_{ciel}^4) \text{ où } T_{ciel} = T_{ext} + \Delta T_{ciel} \text{ avec } \Delta T_{ciel} = -6K \quad (1)$$

- convection mixte (naturelle et forcée sous l'effet du vent) avec l'air extérieur :

$$\varphi_{conv\ ext} = h_{conv\ ext} \cdot (T_{p\ ext} - T_{ext}) \quad (2)$$

Le coefficient d'échange par convection $h_{conv\ ext}$ dépend de la direction et de la vitesse du vent [3].

- En fonction de l'orientation de l'abri, si la paroi est « face au vent », les effets subis sont considérés comme indépendants de la direction :

$$h_{conv\ ext} = h_{conv\ nat} + C_{conv\ forcée} \cdot V \quad (3)$$

Sinon, la paroi est « sous le vent » et ne subit pas ses effets :

$$h_{conv\ ext} = h_{conv\ nat} \quad (4)$$

Le coefficient de convection naturelle $h_{conv\ nat}$ supposé constant est issu de la littérature.

- L'air est considéré comme un fluide parfait, à faible viscosité. Pour une vitesse du vent V supérieure ou égale à 5 m/s, le régime d'écoulement est considéré comme fortement turbulent. « Face au vent » :

$$h_{conv\ ext} = 7,15 \cdot V^{0,78} \quad (5)$$

- conduction à travers la paroi :

$$\varphi_{cond} = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_{p\ ext} - T_{p\ int}) \quad (6)$$

- convection naturelle avec l'air intérieur :

$$\varphi_{conv\ int} = h_{conv\ int} \cdot (T_{p\ int} - T_{int}) \text{ où } h_{conv\ int} = h_{conv\ nat} \quad (7)$$

Dans le cas d'un abri à forte inertie thermique et dans l'hypothèse de régime permanent, chaque surface interne présente une température équivalente $T_{p\ int}$ constante.

Le rayonnement $\varphi_{ray\ int}$ entre les surfaces internes est ici négligé à cause de l'incertitude sur la configuration de stockage des munitions dans l'abri.

En régime permanent, le bilan thermique en surface externe de paroi s'écrit :

$$\alpha \cdot \varphi_{solaire} = \varphi_{ray\ ext} + \varphi_{conv\ ext} + \varphi_{cond} \quad (8)$$

Le terme en puissances 4 de l'équation (1) est linéarisé en ne conservant que les deux membres prépondérants :

$$\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{p\ ext}^4 - T_{ciel}^4) \cong 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{ext}^3 \cdot (T_{p\ ext} - T_{ext}) - 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \Delta T_{ciel} \cdot T_{ext}^3 \quad (9)$$

De plus, comme $\varphi_{cond} = \varphi_{conv\ int}$, d'après les équations (6) et (7) :

$$\left. \begin{array}{l} T_{p\ ext} - T_{p\ int} = \frac{e}{\lambda} \cdot \varphi_{cond} \\ T_{p\ int} - T_{int} = \frac{1}{h_{conv\ int}} \cdot \varphi_{conv\ int} \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_{cond} = \frac{T_{p\ ext} - T_{int}}{\frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{conv\ int}}} \quad (10)$$

Ainsi, le bilan (8) devient :

$$\alpha \cdot \varphi_{solaire} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{ext}^3 \cdot (T_{p\ ext} - T_{ext}) - 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \Delta T_{ciel} \cdot T_{ext}^3 + h_{conv\ ext} \cdot (T_{p\ ext} - T_{ext}) + \varphi_{cond} \quad (11)$$

Soit, en arrangeant les termes :

$$\frac{\alpha \cdot \varphi_{solaire} + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \Delta T_{ciel} \cdot T_{ext}^3}{h_{conv\ ext} + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{ext}^3} = (T_{p\ ext} - T_{ext}) + \frac{\varphi_{cond}}{h_{conv\ ext} + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{ext}^3} \quad (12)$$

La température de flux équivalente est définie comme :

$$T_{\acute{e}q} = \frac{\alpha \cdot \varphi_{solaire} + \Delta T_{ciel} \cdot h_{ray\ ext}}{h_{conv\ ext} + h_{ray\ ext}} \text{ où } h_{ray\ ext} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{ext}^3 \quad (13)$$

Le bilan (12) s'écrit donc :

$$T_{\acute{e}q} + T_{ext} - T_{p\ ext} = \frac{1}{h_{conv\ ext} + h_{ray\ ext}} \cdot \varphi_{cond} \quad (14)$$

Finalement, d'après les équations (10) et (14) :

$$\left. \begin{aligned} T_{p\ ext} - T_{\text{int}} &= \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{conv int}}} \right) \cdot \varphi_{\text{cond}} \\ T_{\acute{e}q} + T_{\text{ext}} - T_{p\ ext} &= \frac{1}{h_{\text{conv ext}} + h_{\text{ray ext}}} \cdot \varphi_{\text{cond}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \varphi_{\text{cond}} = \frac{T_{\acute{e}q} + T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}}{\frac{1}{h_{\text{conv ext}} + h_{\text{ray ext}}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{conv int}}}} \quad (15)$$

La géométrie d'un abri est discrétisée par N plaques planes homogènes, de surface S_j et d'épaisseur constante e_j . La conductivité thermique λ est considérée comme constante. Pour chaque plaque j , les calculs suivants sont effectués :

$$h_{\text{ray ext}} = 4 \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_{\text{ext}}^3 \quad (16)$$

$$T_{\acute{e}q} = \frac{\alpha_j \cdot \varphi_{\text{solaire}} + \Delta T_{\text{ciel}} \cdot h_{\text{ray ext}}}{h_{\text{conv ext}} + h_{\text{ray ext}}} \quad (17)$$

$$P_j = \frac{(T_{\acute{e}q} + T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \cdot S_j}{\frac{1}{h_{\text{conv ext}} + h_{\text{ray ext}}} + \frac{e_j}{\lambda} + \frac{1}{h_{\text{conv int}}}} \quad (18)$$

Les flux thermiques traversant les N plaques sont ensuite additionnés, en négligeant les interactions inter-parois. En régime permanent, le flux total transmis à travers les parois de l'abri est la somme de tous les flux transmis par chaque plaque.

Mais en réalité, les transferts de chaleur ne sont pas instantanés car les parois de l'abri présentent une certaine inertie thermique. Ils s'effectuent en régime pseudo-permanent, c'est-à-dire que sur un intervalle de temps inférieur à la constante de temps d'une paroi, les échanges thermiques peuvent être considérés comme indépendants du temps.

L'équation suivante traduit la conservation de l'énergie en régime pseudo-permanent :

$$\kappa \cdot \left(\sum_j e_j \cdot S_j \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_j P_j \quad \text{où } \kappa = \rho \cdot c \quad (19)$$

En intégrant cette équation par rapport au temps entre les dates t et $t + \Delta t$:

$$\kappa \cdot \left(\sum_j e_j \cdot S_j \right) \cdot \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt = \int_t^{t+\Delta t} \left(\sum_j P_j \right) dt \quad (20)$$

De plus, en discrétisant les intégrales ($t \rightarrow n-1$; $t + \Delta t \rightarrow n$) et en choisissant une méthode explicite pour le calcul de la température au pas de temps n :

$$T_{\text{int}}^n = T_{\text{int}}^{n-1} + \frac{\sum_j P_j}{\kappa \cdot \left(\sum_j e_j \cdot S_j \right)} \cdot \Delta t \quad (21)$$

3. Caractérisation d'abris de stockage

Les abris de stockage de munitions complexes sont répartis en trois grandes catégories :

- les abris de type hangarette avion : abri fermé semi-cylindrique, métallique et bétonné, destiné à la protection des avions de combat (cf. Figure 2),

- les abris « lourds » (à forte inertie thermique), comme l'igloo par exemple, dont la structure interne est similaire à celle de la hangarette (semi-cylindrique) et recouverte d'une couche de terre d'épaisseur très variable (cf. Figure 3),
- les abris « légers » (à faible inertie thermique), comme le sahrad par exemple, constitué de tôles minces (cf. Figure 4).



Figure 2 : Hangarette.



Figure 3 : Igloo.



Figure 4 : Sahrad.

Pour la phase de caractérisation, la méthode consiste à identifier les paramètres qui permettent d'estimer la température induite à partir des entrées météorologiques et géométriques pour un abri de stockage donné, à savoir :

- l'absorptivité α ,
- l'émissivité ε ,
- la conductivité thermique λ ,
- la capacité thermique volumique κ .

Les températures induites estimées par le modèle « Thermody » sont comparées aux conditions induites réellement relevées, au cours de campagnes de mesures in situ en environnement opérationnel [4]. Pour un abri d'inertie thermique importante (abri lourd ou de type hangarette), l'objectif est d'obtenir une moyenne des résidus (erreur entre la température induite calculée et celle mesurée) proche de zéro, avec une incertitude inférieure à $1,5^\circ\text{C}$ (soit $3\sigma < 1,5^\circ\text{C}$, où σ est l'écart-type). De par les hypothèses posées au §2, le modèle n'est pas adapté à la simulation de l'environnement induit à l'intérieur d'abris légers comme le sahrad.

4. Estimation de l'environnement induit dans une autre zone climatique

La caractérisation d'un abri de stockage, telle que présentée au §3, est réalisée pour un site particulier (le plus souvent en France métropolitaine) et pour une période de mesures donnée. Pour la phase d'exploitation, les paramètres précédemment identifiés sont appliqués à un abri de stockage de même type, en un autre lieu du globe.

Plus les munitions complexes sont soumises à des températures élevées, plus elles seront soumises à une accélération de leur vieillissement. Dans le but d'estimer les températures induites extrêmes rencontrées sous un certain type d'abri dans une zone chaude du globe, des conditions météorologiques extrêmes sont appliquées en entrée du modèle.

Les différentes normes en environnement proposent des regroupements des valeurs d'agents d'environnement par zones géographiques. Parmi elles, la norme OTAN [5] différencie quatre types de zones climatiques, en fonction de la température et de l'humidité : des zones chaudes, des zones humides, des zones froides et des zones maritimes.

Les zones climatiques d'intérêt pour l'estimation de températures induites extrêmes sont les zones chaudes A1, A2 et A3. Les cycles météorologiques utilisés en entrée du modèle présentent des températures diurnes minimales et maximales susceptibles d'être rencontrées respectivement pendant 1% du mois le plus froid et 1% du mois le plus chaud de l'année. Les

valeurs de ces températures pour les zones chaudes de la norme OTAN [5], sont rassemblées dans le Tableau 1, et les distributions de la température diurne maximale au cours de l'année sont tracées sur la Figure 5. Sur 6 jours, la variation de la température diurne maximale est suffisamment faible ($< 1^{\circ}\text{C}$) pour que le cycle journalier appliqué en entrée du modèle puisse être répété 6 fois, garantissant ainsi l'exploitabilité de la réponse.

Le graphique sur la Figure 6 illustre les cycles de température météorologique résumés (cf. valeurs du Tableau 1), appliqués en entrée du modèle « Thermody » pour l'estimation de la température induite, dans les zones chaudes A1, A2 et A3. Les températures à l'intérieur d'un abri de stockage de type hangar est estimées par le modèle, représentées avec leur incertitude, sont comparées aux valeurs issues de la norme OTAN [5]. Les valeurs extrêmes de température induite fournies par la norme n'étant pas associées à un type particulier d'abris de stockage, la plage de température à prendre en compte en entrée d'un système de type munitions complexes pour le calcul de son vieillissement est très englobante. L'utilisation d'un outil tel que « Thermody » permet donc de personnaliser l'environnement induit et, dans le cas de la hangar présenté ici, de réduire les marges à prendre en compte pour l'évaluation du potentiel de durée d'emploi restant de ce matériel.

Cycle		Température météo		Température induite	
		T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}
		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
A1	Chaud et sec extrême	32	49	33	71
A2	Chaud et sec	30	44	30	63
A3	Intermédiaire	28	39	28	58

Tableau 1 : Cycles de température résumés pour les zones climatiques A1, A2 et A3 [5].

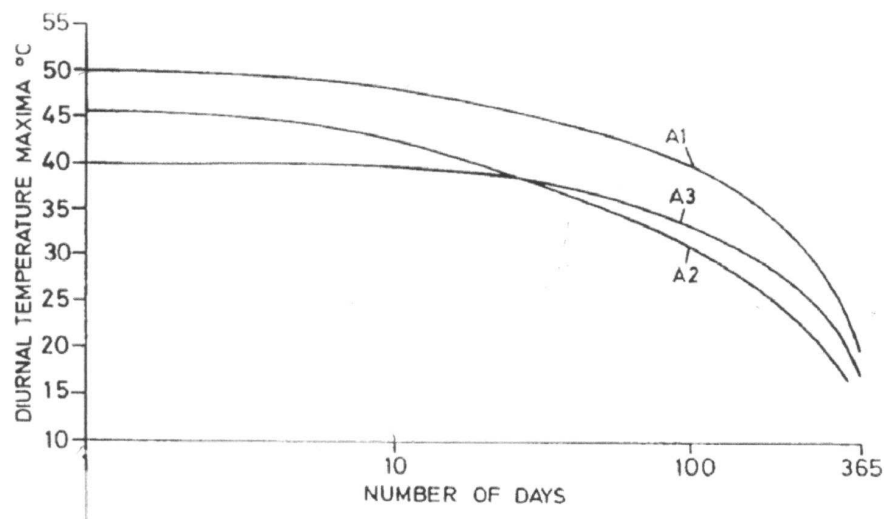


Figure 5 : Nombre de jours sur une année pour lesquels la température diurne maximale donnée est en moyenne dépassée pour les zones climatiques A1, A2 et A3 [5].

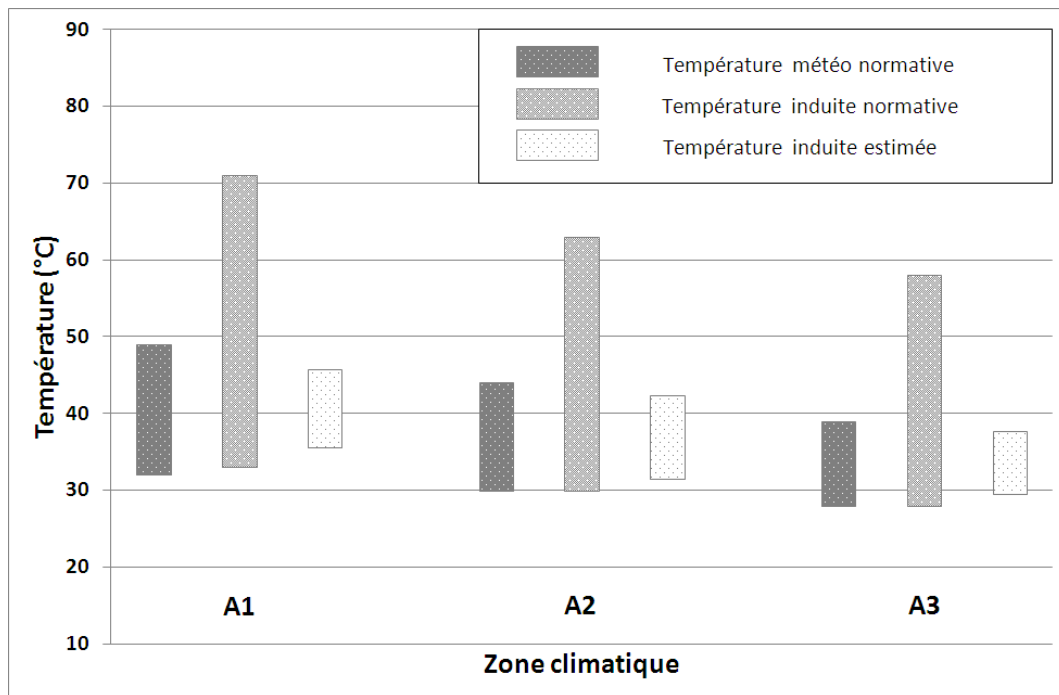


Figure 6 : Cycles de température diurne météorologique issus de la norme OTAN [5] et cycles de température diurne induite estimés par le modèle « Thermody » pour un abri de stockage de type hangarette, comparés à ceux issus de la norme OTAN [5], pour les zones chaudes A1, A2 et A3.

5. Conclusion

Associé à une base de données de mesures in-situ, le modèle « Thermody » est un outil simple pour la caractérisation des abris de stockage de munitions complexes à forte inertie thermique (de type hangarette ou abris lourds) et l'estimation de la température induite en fonction des conditions météorologiques extérieures, en n'importe quel endroit du globe. Plutôt que d'utiliser des valeurs forfaitaires issues de normes, l'environnement opérationnel vécu par le matériel est ainsi personnalisé, ce qui conduit à une meilleure évaluation de son potentiel de durée d'emploi restant.

Des améliorations seraient à envisager pour le modèle présenté, telles que la prise en compte des effets du sol, du chauffage, de la climatisation et de la ventilation à l'intérieur des abris. Toutefois, ces évolutions potentielles restent contraintes par la disponibilité des données météorologiques à appliquer en entrée du modèle (comme la température du sol par exemple). D'autres logiciels commerciaux seront préférés pour l'estimation de la température induite sous abris légers, ou pour des simulations de nature plus complexe.

Références

- [1] THOMSON-CSF, *Données de construction « Thermique – Véhicules et Shelters »* (1980).
- [2] C. Underwood, F. Yik, *Modelling Methods for Energy in Buildings*, John Wiley & Sons (2008).
- [3] Recknagel, Sprenger, Honmann, Schramek, *Manuel pratique du génie climatique*, Tome 1 – Données fondamentales, PYC Livres, Edition 3 (1995).
- [4] T. Marot, P. Trinquet, La personnalisation d'un système à son environnement climatique, *Congrès ASTELAB* (2005).
- [5] OTAN, *Climatic conditions*, STANAG 4370 AECTP-230, Leaflets 2310 et 2311, Edition 1 (2009).