

ANNEXE GENERALE CLIMATIQUE

TOME 2B

LES AGENTS D'ENVIRONNEMENT ET LEURS EFFETS

SOMMAIRE

1	<u>LES PRINCIPAUX AGENTS D'ENVIRONNEMENT</u>	5
1.1	Température	5
1.1.1	Définitions	5
1.1.2	Effets de la température	6
1.2	Pression	6
1.2.1	Définitions	6
1.2.2	Effets de la pression	7
1.2.3	Effets spécifique de l'altitude	7
1.3	Rayonnement solaire	10
1.3.1	Définitions	10
1.3.2	Effets du rayonnement solaire	11
1.3.3	Les effets actiniques	11
1.3.4	Les effets thermiques	13
1.3.5	Effets des radiations solaires	14
1.4	Humidité (vapeur d'eau)	15
1.4.1	Généralités	15
1.4.2	Définitions :	15
1.4.3	Exemple numérique	18
1.4.4	Effets de l'humidité	19
1.4.5	Diagramme des effets de l'humidité	20
1.4.6	Notes explicatives	20
1.4.7	Procédures d'essais	22
1.5	Ruissellement	22
1.6	Poussières	22
1.6.1	Classification des types d'évènements vent de sable et poussières	22
1.6.2	Mécanismes de mise en mouvement du sable et de la poussière	22
1.6.3	Transport par déplacement des dunes (sources proches)	23
1.6.4	Transport par remobilisation de matériaux déposés ou érodés (sources proches)	24
1.6.5	Transport éolien lointain (sources lointaines)	24
1.7	Grêle	24
1.7.1	Définition de la grêle	24
1.7.2	Caractéristiques des grêlons	27
1.7.3	Effets	30

1.8	Boue (projection).....	30
1.8.1	Définitions	30
1.8.2	Effets.....	31
1.9	Micro-organismes.....	31
1.9.1	Rappel	31
1.9.2	Remarques	31
1.9.3	Sensibilité des matériaux	31
1.10	Vent	32
1.10.1	Généralités	32
1.10.2	Modélisation du vent.....	33
1.10.3	Distribution des vitesses de vent sur un site	35
1.10.4	Densité spectrale.....	36
1.10.5	Effets statiques ou quasi-statique	37
1.10.6	Effets dynamiques	37
1.10.7	Effets thermiques	37
1.11	Pluie	37
1.11.1	Généralités	37
1.11.2	Définitions	38
1.11.3	Effets de la pluie	40
1.12	Jet d'eau	41
1.12.1	Définitions	41
1.12.2	Remarques sur le mode opératoire d'essai:.....	42
1.12.3	Cas du lavage haute pression	42
1.13	Immersion	44
1.13.1	Définition.....	44
1.13.2	Les effets.....	45
1.13.3	Degrés de protection à l'eau d'une enveloppe	46
1.13.4	Principaux facteurs de la corrosion par l'eau de mer	46
1.14	Neige	47
1.14.1	Définitions	47
1.14.2	Interactions de la neige avec les structures.....	49
1.15	Glace (givre blanc ou pluie verglaçante).....	50
1.16	Brouillard.....	52
1.16.1	Définitions	52
1.17	Brouillard salin.....	52
1.17.1	Définitions	52
1.17.2	Effets.....	52
1.17.3	Méthode de calcul de la densité de la solution saline	54

1.18	Gaz polluants acides.....	56
2	<u>LES EFFETS DES AGENTS D'ENVIRONNEMENT PAR SEGMENT DU PROFIL DE VIE</u>	60
2.1	Opérations logistiques.....	60
2.1.1	Le transport.....	60
2.1.2	Manutention et stockage.....	63
2.2	Mise en œuvre.....	69
2.2.1	Déploiement sur installations fixes	69
2.2.2	Déploiements et mise à poste sur véhicule	71
2.2.3	Déploiement sur bâtiment naval.....	76
2.2.4	Déploiement sur les sous-marins	79
2.2.5	Déploiement sur les aéronefs.....	81
2.3	Systèmes spécifiques	87
2.3.1	Equipements portables ou portatifs	87
2.3.2	Systèmes d'armes	90
3	<u>INTERACTION ENTRE AGENTS D'ENVIRONNEMENT CLIMATIQUES</u>	94
3.1	Généralités sur les différentes combinaisons et leurs effets	94
3.2	Evénements climatiques	96
3.3	Influence sur le corps humain des agents d'environnement	99
3.3.1	Introduction.....	99
3.3.2	Les paramètres climatiques.....	99
3.3.3	Combinatoire des paramètres climatiques, les effets thermiques	100

1 LES PRINCIPAUX AGENTS D'ENVIRONNEMENT

1.1 Température

1.1.1 Définitions

La température est une grandeur intensive, ce qui rend sa mesure difficile et incite à recourir à une échelle pratique, reposant sur des phénomènes physiques répétables et aisément identifiables, permettant de la repérer.

Aujourd'hui, l'échelle en vigueur est **l'échelle internationale de température de 1990 (EIT-90)**.

L'EIT-90 diffère de l'EIT-68 sur plusieurs points importants : elle utilise le point triple de l'eau (273,16 K), au lieu du point de congélation de l'eau, comme point de définition ;

L'échelle de température la plus répandue est le *degré Celsius*, dans laquelle l'eau gèle à 0 °C et bout à environ 100 °C dans les conditions standard de pression. Dans les pays utilisant le système impérial (anglo-saxon) d'unités, on emploie le degré Fahrenheit (*gel à 32 °F et ébullition à 212 °F*). L'unité du système international d'unités, d'utilisation scientifique et définie à partir du zéro absolu, est le *kelvin* (nom commun dérivé du nom de William Thomson, Lord Kelvin).

Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau (H₂O), et une variation de température de 1 K est équivalente à une variation de 1 °C. La température de 0 K est égale à - 273,15 °C et correspond au zéro absolu (le point triple de l'eau est donc à la température 0,01 °C).

Le tableau 1 indique quelques uns des points fixes de définition de l'EIT 90.

Point fixe	EIT 90	
	T (K)	t (°)
Point triple du mercure	234,3156	-38,8344
Point triple de l'eau	273,16	0,01

Tableau 1 : Points fixes de définition de l'EIT90

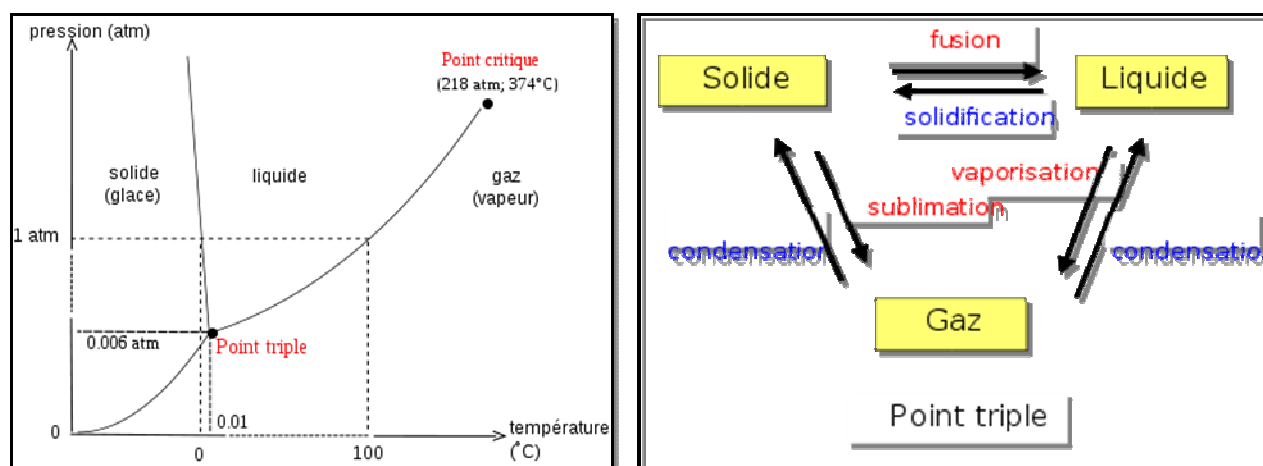


Figure 1 : Diagramme du point triple

Nota : Le **point triple** est, en thermodynamique, un point du diagramme de phase qui correspond à la coexistence de trois états (liquide, solide et gazeux) d'un corps pur. Il est unique et s'observe seulement à une température et une pression données ; dans cet état la variance est nulle.

Exemple : le point triple de l'eau est à : **T = 273,16 K** (soit 0,01 °C) et **P = 611 Pa** (soit 0,006 atm).

1.1.2 Effets de la température

La température peut altérer, de façon temporaire ou définitive, le fonctionnement des matériels en modifiant les propriétés physiques ou les dimensions du (des) matériaux qui le compose (ent)

Les effets induits les plus fréquemment rencontrés sont :

- fusion et autre changement d'état,
- distorsions, coincements par dilatation thermique différentielle,
- détérioration de l'étanchéité,
- augmentation de la pression interne,
- etc.

1.2 Pression

La pression atmosphérique est due au poids de l'air au-dessus de la surface de la terre, l'air s'étendant jusqu'à une hauteur de 80 km.

1.2.1 Définitions

Cette pression est mesurée à l'aide d'un baromètre. Elle dépend entre autres de l'altitude, de la température et de l'humidité. Par convention, la pression de l'air pur et sec au niveau de la mer à une température de 15°C est de 1013,25 hPa.

L'unité du Système International est le pascal qui représente l'effort uniforme exercé par une force de 1 newton sur une surface plane de 1 mètre carré.

Conversions d'unités métriques :

$$1 \text{ bar (bar)} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ millibar (mbar)} = 10^2 \text{ Pa} = 1 \text{ hectopascal (hPa)}$$

$$1 \text{ atmosphère normale (atm)} = 760 \text{ mm Hg} = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atmosphère technique (at)} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 9,80665 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ torr (torr)} = 1 \text{ millimètre de mercure (mm Hg)} = 1,333224 \times 10^2 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ millimètre d'eau (mm H}_2\text{O ou mm CE)} = 9,80665 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mètre d'eau (m H}_2\text{O ou m CE)} = 9,80665 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Conversions d'unités non métriques:

$$1 \text{ pound force per square inch (lbf/sq.in ou psi ou PSI)} = 6,894757 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ pound force per square foot (lbf/sq.ft ou psf ou PSF)} = 47,8803 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ inch of mercury (in Hg)} = 3,38638 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ inch of water (in H}_2\text{O)} = 2,49089 \times 10^2 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ foot of water (ft H}_2\text{O)} = 2,98907 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Nota : les pressions indiquées peuvent être absolues ou relatives. Dans certains cas cela sera indiqué, dans d'autres cela sera sous-entendu par le contexte. Pour les unités anglo-saxonnes, les pressions absolues sont indiquées *psia*, les pressions relatives devraient être indiquées *psig* (g pour gauge : manomètre) mais sont le plus souvent indiquées *psi*. Par référence aux manomètres les pressions sont indiquées en *psi* au-dessus de la pression atmosphérique et en pouces de mercure (*in Hg*) au-dessous, mais dans ce cas en partant de la pression atmosphérique (ce sont donc des dépressions).

La pression atmosphérique normale prise en compte est souvent 15 *psia* (1034.21 hPa) dans la littérature anglo-saxonne.

Pression atmosphérique et température de l'air en altitude

La relation entre la hauteur, la pression, la densité et la température se fonde sur des relevés météorologiques. Différentes approches mathématiques existent. La variabilité des paramètres et la méconnaissance de leurs lois de variation interdisent toutes équations représentatives de cette relation.

Afin de disposer d'une référence mondiale, cette triple relation : altitude, pression, température a été définie : un document intitulé " atmosphère standard internationale.

1.2.2 Effets de la pression

- la pression atmosphérique peut avoir des effets directs ou indirects.
- les effets induits les plus fréquemment rencontrés sont :
 - o fuites de fluide des matériels comportant des joints,
 - o déformation, implosion ou explosion d'enveloppe étanche,
 - o dysfonctionnement au démarrage et en fonctionnement des moteurs thermiques,
 - o modification des propriétés physiques et chimiques,
 - o défaillance des fermetures hermétiques.

1.2.3 Effets spécifique de l'altitude

Les compresseurs ou autres moyens de conditionnement d'air utilisés pour compenser la diminution de la pression atmosphérique avec l'altitude ont un régime de fonctionnement qui dépend de la pression ambiante ; une attention particulière doit par conséquent être portée aux ventilateurs qui fonctionnent près des conditions de décrochage.

Le refroidissement des équipements devient plus difficile avec l'altitude en raison de la diminution de la densité de l'air. Les échanges de chaleur par convection naturelle sont proportionnels à la racine carrée de la densité de l'air de refroidissement et l'efficacité du refroidissement à une altitude de 15 000 mètres est d'environ 22% de ce qu'elle est au niveau de la mer.

Nota : à 100 km d'altitude (pression de l'air = 0.013Pa) l'air ne peut plus être considéré comme un conducteur de chaleur.

Lorsque des composés au silicone sont utilisés pour diminuer les résistances thermiques de contact, ou bien pour des joints d'étanchéité ou des sièges d'appui, une migration de ces composés, accélérée par l'altitude, peut intervenir entraînant notamment la contamination des contacts électriques.

A 12 km d'altitude, l'humidité de l'air est d'environ 2 000 fois plus faible qu'au niveau de la mer. Or, la vapeur d'eau et l'oxygène de l'air participent à la création sur les surfaces en glissement d'un film lubrifiant dont les effets se dégradent beaucoup au-delà de 6000 mètres d'altitude, ce qui accroît les coefficients de frottement. La sécheresse de l'air à haute altitude provoque une usure accélérée des pièces en frottement. Les charbons des collecteurs y sont particulièrement sujets : on peut réduire ce phénomène en utilisant des charbons contenant de l'iodure de cadmium et du chlorate de plomb ou bien en créant un film de lubrification artificiel.

La capacité d'isolation électrique de l'air diminue avec l'altitude, ce qui fait apparaître des risques de claquage.

Le tableau ci-dessous donne les coefficients multiplicateurs permettant d'obtenir les tensions de claquage pour des électrodes planes et parallèles, séparées par une couche d'air de plus de 5 mm.

Pression (hPa)	Température en degrés Celsius					
	-40	-20	0	+20	+40	+60
170	0.26	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19
340	0.47	0.44	0.42	0.39	0.37	0.24
510	0.68	0.64	0.60	0.56	0.53	0.50
675	0.87	0.82	0.77	0.72	0.68	0.64
850	1.07	0.99	0.93	0.87	0.82	0.77

Ces coefficients ont été établis à partir des valeurs aux conditions normales (+25°C et 1013 hPa) pour les pressions et températures données dans le tableau.

Nota : La tension de claquage baisse lorsque les éléments en présence jouant le rôle d'électrode sont pointus.

Si les tensions électriques ne sont pas suffisamment hautes ou la pression atmosphérique suffisamment basse pour entraîner le claquage, des décharges de Corona peuvent néanmoins se produire autour des éléments à fort champ électrique comme les mâts d'antenne ou les câbles de puissance radiofréquences.

Ce phénomène peut conduire à des pertes de puissance significatives sur les circuits de haute tension. Cela peut également produire des interférences radioélectriques ou des claquages de surface d'isolateurs. La décharge Corona produit de l'ozone qui, à son tour, peut oxyder le caoutchouc et différents matériaux synthétiques. Elle produit aussi des oxydes d'azote qui se combinent à l'humidité pour donner des acides attaquant à leur tour les métaux et différents matériaux.

Les changements rapides d'altitude peuvent déformer les boîtiers, joints et portées d'étanchéité et entraîner leur détérioration, la pénétration de l'humidité dans les compartiments supposés étanches et conduire éventuellement à des ruissellements d'eau et à la corrosion. Les changements rapides d'altitude peuvent également agiter les électrolytes et accroître leur vitesse de réaction.

La vitesse d'évaporation des liquides s'accroît avec l'altitude comme avec la température. De ce fait, de nombreux lubrifiants ayant une tension de vapeur relativement élevée, ne sont pas utilisables sous de basses pressions et l'évaporation des électrolytes peut contaminer l'air et les matériels environnants.

Les coefficients de frottement entre les surfaces sont généralement accentués par le froid. A haute altitude les risques de soudage à froid ne sont donc pas exclus.

En l'absence d'humidité, le graphite devient abrasif.

La pression atmosphérique est un facteur significatif pour l'évolution des contaminations et de la corrosion. A titre d'exemple, au-dessus d'une solution corrosive, la pression de l'air est l'un des facteurs déterminant le taux d'absorption de l'oxygène dans la réaction d'oxydation.

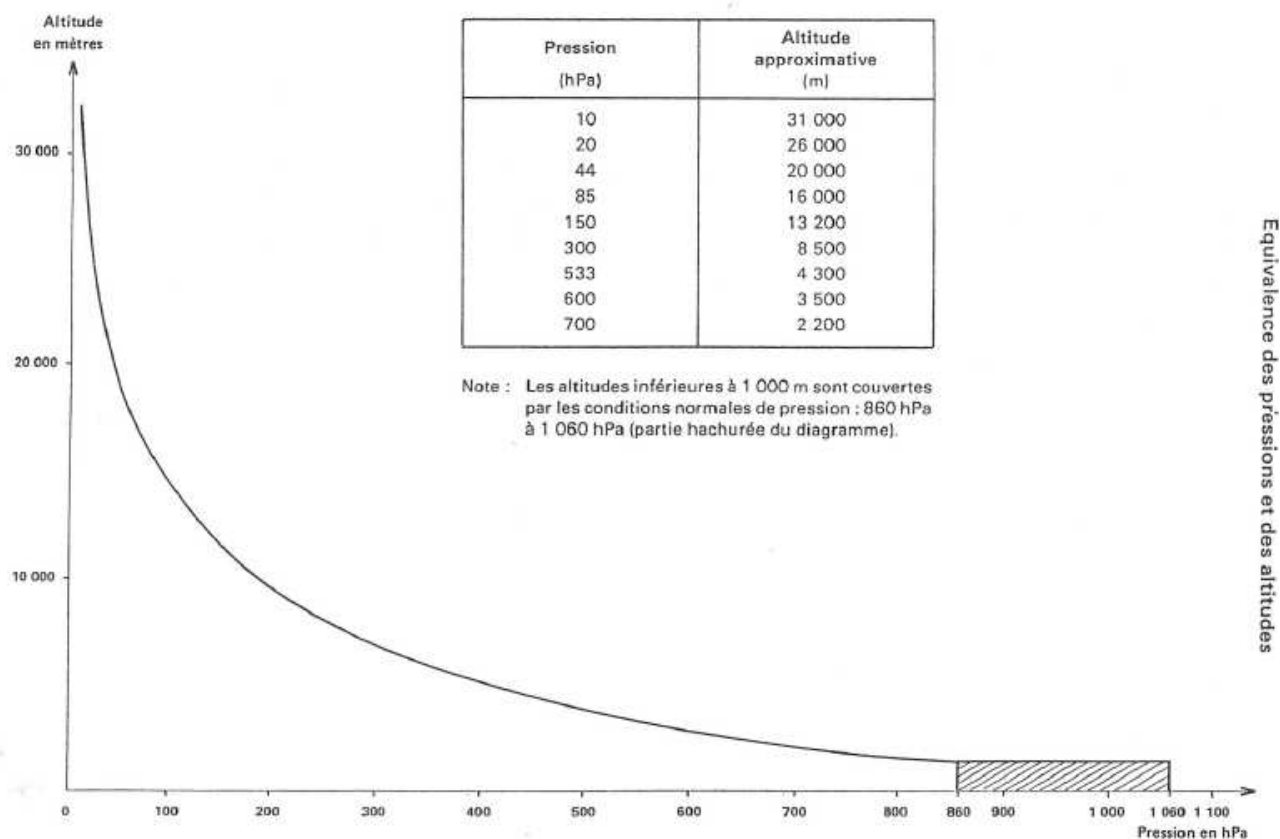


Figure 2 : Equivalence des pressions et des altitudes

1.3 Rayonnement solaire

1.3.1 Définitions

Les fusions thermonucléaires qui se produisent dans la masse du soleil libèrent de l'énergie sous forme d'ondes ou radiations électromagnétiques de fréquence élevée. Le rayonnement corpusculaire des particules à grande vitesse émises par le soleil ne représente qu'une infime partie de l'énergie totale. Le rayonnement solaire peut donc être considéré comme électromagnétique.

Cette énergie électromagnétique qui traverse l'espace se compose de radiations de différentes longueurs d'onde. Bien que ce rayonnement intéresse toutes les longueurs d'ondes, l'énergie émise est principalement contenue dans le visible et le proche infrarouge.

La loi de Wien permet de dire que le soleil se comporte de façon approchée comme un corps noir à la température de 6 000 K. Il rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (Courtes longueurs d'onde).

La constante solaire, qui définit l'intensité du rayonnement ou de l'énergie radiante atteignant les couches supérieures de l'atmosphère terrestre est de $1\,360\text{ W.m}^{-2}$; cette référence à la mesure hors atmosphère est repérée par l'emploi de l'abréviation "MO" pour "Masse atmosphérique 0". Le niveau de la mer correspond à M1, le soleil étant au zénith et la pression atmosphérique de 1 013,25 hPa. M2 correspond à deux masses atmosphériques, soit une élévation de soleil de l'horizon.

Pour M0, M1 et M2 la répartition des valeurs est indiquée dans le tableau 2.

	TOTAL W m^{-2}	INFRA ROUGE	VISIBLE	ULTRA VIOLET
M0	1360	51 %	40 %	9 %
M 1	970	50 %	45 %	< 5 %
M 2	770	53 %	44 %	< 3 %

Tableau 2 : Répartition de la puissance pour M0, M1 et M2

La longueur d'onde correspondant au maximum d'émissions se situe vers $0,5\text{ }\mu\text{m}$.

Cette dispersion entre M0 et M1, s'explique par la diffusion dans toutes des directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière. La valeur de 1120 W.m^{-2} est souvent retenue comme la valeur maximum relevée au niveau de la mer.

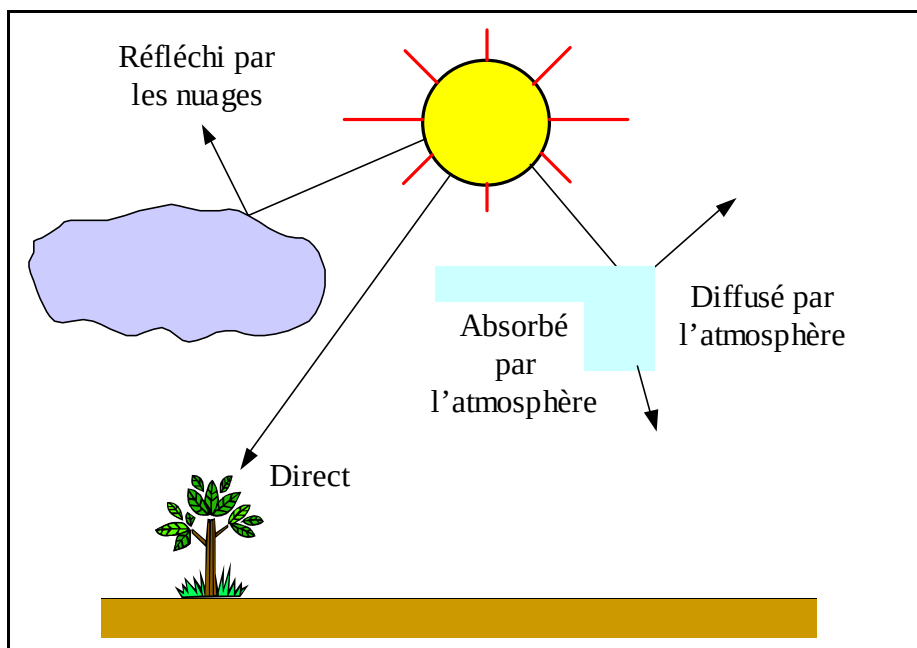


Figure 3 : Schéma de la dispersion du rayonnement

1.3.2 Effets du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire a deux types d'effets sur les matériels : actinique et thermique.

Les effets induits les plus fréquemment rencontrés sont :

- pour ce qui concerne les effets actiniques :
 - o détérioration des élastomères naturels et synthétiques,
 - o détérioration des polymères,
 - o modification des couleurs,
 - o modification des peintures,
- pour ce qui concerne les effets thermiques :
 - o fragilisation des soudures et des assemblages collés,
 - o modification de la résistance et de l'élasticité,
 - o élévation des températures d'enveloppe extérieure pouvant atteindre des températures très élevées, voire supérieures à 100°C, entraînant, entre autres, un échauffement interne.

Afin de prendre en compte totalement la contrainte "rayonnement solaire" il faut étudier les pouvoirs absorbant et rayonnant de la surface à étudier.

1.3.3 Les effets actiniques

1.3.3.1 Le phénomène de vieillissement

Les effets liés aux réactions photochimiques provoquées dans les matériaux par l'énergie d'activation du rayonnement dans un contexte chimique donné, combinés aux gaz et autres agents polluants contenus dans l'atmosphère, à la température ambiante et à ses variations, déclenchent un processus souvent désigné par le terme *vieillissement*.

Ce phénomène fait donc intervenir diverses réactions qui se produisent simultanément et souvent en interaction. Bien que le rayonnement solaire et surtout sa composante ultra-violette soit souvent le facteur essentiel, ses effets peuvent rarement être dissociés de ceux des autres facteurs du vieillissement.

Par exemple, si l'effet du rayonnement UV sur le PCV (polychlorure de vinyle) est faible par lui-même, il accroît néanmoins de façon appréciable la sensibilité de ce matériau à la dégradation thermique, phénomène dans lequel l'oxygène joue préalablement un rôle prépondérant. La part que jouent les différents facteurs est souvent difficile à déterminer dans l'ensemble du processus global et, du fait que les vitesses de réactions obéissent à des lois particulières à chacune d'elles, il est très difficile de reproduire le phénomène et surtout de le modifier dans le but d'obtenir un vieillissement accéléré qui serait comparable au vieillissement naturel.

1.3.3.2 Le déclenchement des réactions photochimiques

Ces réactions dues à l'énergie d'activation apportée par le rayonnement solaire supposent :

- que ce rayonnement contienne des bandes de fréquences abordables par le matériel exposé,
- et que la quantité d'énergie absorbée dans ces bandes de fréquences soit suffisante pour activer les molécules.

Pour prévoir les effets d'un rayonnement, il faut donc connaître non seulement son intensité et sa répartition spectrale, mais aussi l'énergie d'activation nécessaire pour déclencher les diverses réactions susceptibles de se produire dans les matériaux considérés et en présence des fluides environnants, ainsi que les fréquences (ou longueurs d'ondes) auxquelles ces matériaux sont le plus sensibles de par leurs structures moléculaires.

L'énergie d'activation se mesure en calories par mole g^{-1} ou en joules par mole g^{-1} . Connaissant par la formule de Planck ($E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$) la quantité d'énergie véhiculée par un photon en fonction de sa longueur d'onde (et donc de sa fréquence) et en supposant que chaque molécule du matériau considéré en reçoive un seul à l'instant t, on obtient aisément l'énergie reçue par mole g^{-1} en multipliant par le nombre d'Avogadro cette énergie par quantum.

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}^{-1} \quad (\text{Constante de Planck})$$

$$c = 3.10^{14} \text{ } \mu\text{m.s}^{-1} \quad (\text{Vitesse de la lumière})$$

$$\lambda = \text{longueur d'onde (en } \mu\text{m) de la composante considérée}$$

$$N = 6.023 \times 10^{23} \text{ molécules} \quad (\text{Nombre d'Avogadro})$$

Les énergies véhiculées par quantum et reçues par mole g^{-1} sont indiquées dans le tableau 3 pour chaque longueur d'onde. On constate que ces énergies sont beaucoup plus importantes dans la bande des violets et surtout des ultra-violets ($\lambda < 0.4 \text{ } \mu\text{m}$) que dans la partie visible ou infrarouge du spectre ($\lambda > 0.4 \text{ } \mu\text{m}$).

Domaine Spectral		Longueur d'onde (en μm)	Energie par quantum (en J)	Energie par mole. g^{-1} (en J)
Rayons X		0.0001	1.986×10^{-5}	1.196×10^9
Ultra-violet		0.1	19.86×10^{-19}	11.96×10^5
		0.2	9.93×10^{-19}	5.98×10^5
		0.3	6.62×10^{-19}	3.99×10^5
Visibl	Violet	0.4	4.97×10^{-19}	2.99×10^5
	Bleu-vert	0.5	3.97×10^{-19}	2.39×10^5
	Orange	0.6	3.31×10^{-19}	1.99×10^5

	Rouge	0.7	2.84×10^{-19}	1.71×10^5
		0.8	2.48×10^{-19}	1.51×10^5
Infrarouge		1.0	19.86×10^{-19}	11.96×10^5
		3.0	6.62×10^{-19}	3.99×10^5
		10.0	1.97×10^{-19}	1.20×10^5
		100.0	1.97×10^{-19}	1.20×10^5

Tableau 3 : Tableau des énergies

Il importe de savoir que la plupart des réactions chimiques intervenant dans le processus de vieillissement actinique requièrent des énergies de l'ordre de 100 000 à 400 000 Joules par mole.g⁻¹.

Les bandes du spectre de faibles longueurs d'onde sont les plus significatives dans le déclenchement de ce processus, notamment les longueurs d'ondes voisines de 0.3 µm auxquelles sont très sensibles les polyéthylènes, polystyrènes, polypropylènes, polychlorures de vinyle et les thermoplastiques, mais il en est de même pour la plupart des thermodurcissables et les caoutchoucs. Il existe cependant des produits absorbant les UV. Ce sont des produits à base de benzotriazole ou de benzophénone qui, mélangés au matériau ou utilisés comme revêtement, peuvent retarder la dégradation actinique.

Les effets actiniques se manifestent d'abord à la surface des matériaux exposés. Si l'évacuation de l'énergie est suffisante ou bien si la durée d'exposition n'est pas trop longue, les volumes atteints par la dégradation actinique peuvent être limités. De ce fait, les structures de forte épaisseur seront moins affectées que les feuilles minces.

1.3.4 Les effets thermiques

1.3.4.1 Les principaux effets provoqués

Les effets des réactions photochimiques concernent essentiellement les polymères.

Si elles se produisent dans une atmosphère contenant de l'oxygène (cas de l'exposition à l'air ambiant), ces réactions comportent des oxydations qui entraînent des modifications de la formule moléculaire du matériau exposé.

Les autres effets fréquemment constatés sont :

- des ruptures et des modifications des chaînes moléculaires,
- des fragilisations, des durcissements ou des pertes d'élasticité des matériaux (thermoplastiques ; caoutchoucs ; fibres textiles),
- des craquelures et des fissures (thermodurcissables ; caoutchoucs ; revêtements de surface),
- l'altération des couleurs (des revêtements de surface notamment).

1.3.4.2 Effets thermiques

1.3.4.2.1 Le caractère différentiel des effets thermiques

Les effets thermiques du rayonnement solaire sur un matériel sont différents des effets provoqués par la seule température du milieu ambiant. Ceci est dû au fait que le bilan global des chaleurs absorbée et réfléchi dépend non seulement des caractéristiques du rayonnement et du milieu ambiant, mais aussi des caractéristiques du matériel lui-même.

Les variations des caractéristiques du matériel, ainsi que le fait que ce matériel est généralement exposé sur une seule face à la fois, sont des causes d'écarts de température qui peuvent être grands, ce qui a pour conséquence des dilatations ou des contractions différentielles parfois importantes, génératrices de contraintes et de déformations.

1.3.4.2.2 Les principaux effets provoqués

Les variations de température, qu'elles soient globales ou surtout différentielles, peuvent provoquer :

- du grippage ou au contraire des jeux, dans les pièces en mouvement,
- une dégradation du fonctionnement ou un dérèglement des mécanismes,
- des variations de pression dans les fluides stockés,
- des pertes d'étanchéité,
- des modifications des caractéristiques des matériaux (élasticité ; résilience ; etc ...) ou même de leurs structures internes (ramollissement des polymères, etc ...)
- des modifications des caractéristiques des composants électriques et électroniques,
- des modifications des caractéristiques des peintures, revêtements et traitement de surface (cloquage ; écaillage ; atténuation des couleurs ; etc ...),
- l'exsudation des matériaux composites et des explosifs,
- l'affaiblissement des soudages, brasages, collages,
- etc ...

1.3.5 Effets des radiations solaires

Le rayonnement solaire intervient rarement seul mais, le plus souvent, en combinaison avec d'autres facteurs liés :

- les uns, au milieu extérieur et à son ambiance,
- les autres, au matériel à essayer à l'usage qui en est fait.

Le problème des effets du rayonnement solaire doit donc être considéré de plusieurs façons.

1.3.5.1 Les deux types d'effets du rayonnement solaire

Les deux types du rayonnement solaire seront différents suivant les processus déclenchés.

Bien que cette distinction ne soit pas toujours nette, il est d'usage de considérer :

- les effets actiniques, liés aux réactions photochimiques des matériaux, provoqués par l'énergie d'activation communiquée par le rayonnement (ces réactions seront différentes selon qu'elles se produiront en présence ou non d'oxygène, mais aussi d'autres produits polluants,
- les effets thermiques, liés à l'élévation de température provoquée par cet apport d'énergie.

1.3.5.2 Les facteurs à prendre en considération

L'énergie rayonnée par une source et reçue par le matériel qui y est exposé, est fonction :

- des caractéristiques du rayonnement : intensité globale ; répartition spectrale ; etc (voir appendice 3).
- des caractéristiques du milieu ambiant :
 - altitude ; pression
 - température et ses variations

- o vitesse de brasse de l'air
- o présence (ou absence) d'oxygène, d'ozone et éventuellement d'autres agents polluants
- o humidité
- des caractéristiques du matériel exposé au rayonnement :
 - o forme ; dimensions ; épaisseurs ; etc.
 - o états de surface ; couleur ; protections diverses
 - o matériaux constitutifs du matériel, caractérisés par leurs structures moléculaires, leurs coefficients d'absorption et de réflexion (qui dépendent eux-mêmes de la longueur d'onde de la radiation considérée), leurs conductivités thermiques, leurs chaleurs spécifiques, etc.
- de la durée d'exposition au rayonnement.

Ces paramètres devront donc être connus pour évaluer correctement les effets du rayonnement solaire sur le matériel à essayer.

1.4 Humidité (vapeur d'eau)

1.4.1 Généralités

La composition de l'air, Air sec (en volume) Vapeur d'eau et variables :

Azote :	78%
Oxygène :	21 %
Argon :	0,9%
Eau :	0 à 7 %
Dioxyde de carbone :	100 à 1000 ppm
Néon :	18 ppm
Hélium :	5 ppm
Méthane :	2 ppm
Krypton :	1,1 ppm
Hydrogène :	0,5 ppm
Oxyde d'azote :	0,5 ppm
Anhydride sulfureux :	0 à 1 ppm
Xénon :	0,09 ppm
Ozone :	0 à 0,1 ppm
Peroxyde d'azote :	Traces

La vapeur d'eau est en proportion variable.

1.4.2 Définitions :

Paramètres de bases

Les définitions ci-après sont extraites de la recommandation **RM.Aéro 808 01**, éditée par le B.N.A.E. et sont limitées, dans un souci de simplicité, aux paramètres les moins aisément perceptibles de façon intuitive ou dans la vie quotidienne.

Notion de saturation

La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air à une pression donnée ne peut excéder une certaine valeur au-delà de laquelle toute quantité d'eau supplémentaire ne peut apparaître que sous forme liquide. A cette valeur, l'air est dit saturé. La manifestation visible de cette saturation est la condensation.

Pression partielle de vapeur d'eau

Dans un mélange de gaz parfaits, la pression totale est la somme des pressions partielles des constituants du mélange (*relation de Dalton*) et les pressions partielles des constituants du mélange sont dans le rapport des fractions molaires.

En considérant l'air humide comme le mélange d'air sec et de vapeur d'eau, et en supposant que ces deux gaz suivent le comportement d'un gaz parfait, on peut écrire que la pression totale de l'air humide est la somme de la pression partielle de la vapeur d'eau (e') et de la pression partielle de

l'air sec (p_a) : $p = p_a + e'$

Avec :

$$e' = x_v \cdot p \text{ et } p_a = x_a \cdot p$$

$$x_v = \frac{n_v}{n_v + n_a}, x_a = \frac{n_a}{n_v + n_a}$$

où

x_v = fraction molaire de la vapeur d'eau de l'échantillon d'air humide,

x_a = fraction molaire de l'air de l'échantillon d'air humide,

n_v = nombre de moles de vapeur d'eau,

n_a = nombre de moles d'air sec.

Pression de vapeur saturante

C'est la pression de vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau liquide ou de glace à la même température et à la même pression. En d'autres termes, c'est la valeur maximale que peut atteindre la pression partielle de la vapeur à cette température. Au-delà de cette valeur, il y a condensation.

Les indices "w" (water) et "i" (ice) permettent de distinguer les cas de l'équilibre au-dessus d'une surface d'eau liquide ou de glace.

Les pressions de vapeur saturante e_w et e_i s'expriment généralement en Pascal et ne dépendent que de la température.

Température de rosée

Lorsque l'on refroidit l'air humide en maintenant le rapport de mélange constant, on atteint l'état de saturation pour une température appelée *température de rosée* (T_d) lorsque celle-ci est supérieure à 0 °C ou *température de gelée* (T_f) lorsqu'elle est inférieure à 0 °C.

La température de rosée ou de gelée est la température pour laquelle la pression de vapeur saturante est égale à la pression partielle de la vapeur dans l'air humide. Cette pression partielle peut donc s'exprimer de la manière suivante, pour le cas de la température de rosée (avec une définition analogue pour T_f) :

$$e' = e'_w(p, T_d) = f_w(p, T_d) \cdot e_w(T_d)$$

$$e' = e'_i(p, T_f) = f_i(p, T_f) \cdot e_i(T_f)$$

Dans ces relations, T_d et T_f s'expriment en kelvin. Dans la pratique, on utilise souvent les *degrés Celsius* et il convient alors d'employer les symboles θ_d et θ_f .

Température humide

La température humide (T_w) est définie comme la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air humide, dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation ne serait prélevée que sur l'air humide.

Pratiquement, c'est la température indiquée par le thermomètre humide d'un psychromètre à aspiration fonctionnant de manière idéale.

$$e' = e'_w(T_d, p) = e'_w(T_w, p) - A_w \cdot p \cdot (T - T_w)$$

Le coefficient théorique A_w se calcule d'après la formule donnée dans la norme **NF X 15-118**. [12].

Toutefois, dans la pratique, le coefficient A_w dépend des principes de conception et des technologies de réalisation utilisées. Il ne peut être déterminé que par étalonnage de l'instrument et doit être fourni par le constructeur pour le domaine de fonctionnement donné.

Rapport de mélange

C'est le rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec à laquelle cette vapeur est mélangée.

$$r = \frac{m_v}{m_a}$$

avec m_v = masse de la vapeur d'eau et m_a = masse d'air sec ; r s'exprime en gramme par kilogramme.

Humidité absolue

C'est le rapport entre la masse de vapeur d'eau et le volume occupé par l'air humide considéré, dans les conditions de pression et de température données.

$$H = \frac{m_v}{V}$$

avec m_v = masse de vapeur d'eau, V = volume d'air humide considéré ; H s'exprime en grammes par mètre cube.

Humidité relative

L'humidité relative (h) est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau P_v et la pression de vapeur saturante P_a à une température donnée.

$$h = \frac{P_v}{P_a}$$

On exprime l'humidité relative sous forme de taux d'humidité relative en % :

$$HR = 100 h = 100 \frac{P_v}{P_a}$$

A pression et température constantes, l'humidité relative est égale au rapport, exprimé en %, de la masse d'eau contenue dans l'air à la masse d'eau que cet air contiendrait à saturation.

L'accès à la mesure sera toujours indirect. L'air étant un mélange de gaz, la grandeur de base est la pression partielle de chacun des constituants. A ce jour, il n'y a pas de capteur pour cette grandeur. Elle est utilisée dans les calculs ou pour le raisonnement.

L'humidité de l'air peut être caractérisée par une masse exprimant, par exemple, les grammes de vapeur d'eau, rapportés soit à la masse de l'air sec, soit à son volume. On parlera de rapport de mélange (*g/kg*) ou d'humidité absolue (*g/m³*). Compte tenu des difficultés de mise en œuvre, les méthodes gravimétriques ne sont plus utilisées.

On caractérisera donc l'humidité de l'air par deux autres paramètres, la température de rosée ou l'écart psychrométrique, parce que des appareils de mesure peuvent être mis en œuvre assez simplement.

On notera toutefois que l'unité la plus "pratiquée" est le pourcentage d'humidité relative. En général, tous les essais décrits dans les normes spécifient une température d'air et un pourcentage d'humidité relative.

En fait, la notion d'humidité relative est rapportée à la pression partielle de saturation

A température et pression données, l'air ne peut accepter qu'une quantité limitée de vapeur d'eau en mélange.

Au delà, la vapeur d'eau se condense¹ et la quantité de vapeur d'eau à laquelle la condensation apparaît correspond à la saturation. La température à laquelle le phénomène se produit est la température de rosée.

1.4.3 Exemple numérique

Soit un mètre-cube d'air sec, à 1013 hPa, à 21°C. Il peut contenir, en mélange, jusqu'à 18,3 g de vapeur d'eau. Cette valeur de mélange définit l'humidité absolue. Au-delà de ce poids, la vapeur d'eau ne se mélangera plus à l'air et l'excédent se condensera.

Cette valeur de 18,3 g correspond à la saturation à 21°C. On dit alors que l'humidité relative est de 100%.

¹ La condensation est le nom donné au phénomène physique de changement d'état de la matière qui passe d'un état dilué (gaz) à un état condensé (solide ou liquide). Dans la nature la condensation de la vapeur d'eau naturellement présente dans l'air est une étape importante du cycle de l'eau, c'est l'origine notamment de la rosée des nuages, de la pluie, de la neige, du givre ou de certaines formes de verglas (brouillard givrant, qui est une forme de condensation solide) donc des hydrométéores.

Si le mètre-cube d'air à 21°C ne contient que 6.4 g de vapeur d'eau en mélange, on dit que l'humidité relative est de $(6,4 \times 100) : 18,3 = 35\%$.

Si partant de 21°C, on abaisse la température de ce mètre-cube d'air contenant 6,4 g de vapeur d'eau, le phénomène de condensation apparaîtra vers 5°C car à cette température les 6,4g représentent la valeur de saturation. Cette température dite « du point de rosée », caractérise aussi la teneur de l'air en vapeur d'eau.

L'air à 21°C, à 35% d'humidité relative, contient 6,4 g de vapeur d'eau par m³ et présente une température de rosée de 5°C

1.4.4 Effets de l'humidité

L'humidité a des effets physiques et chimiques sur les matériels. Les variations de la température et de l'humidité peuvent également déclencher des phénomènes de condensation à l'intérieur des matériels. Cette condensation pour des températures inférieures à 0°C devient du givre avec ses propres contraintes.

Les effets induits les plus fréquemment rencontrés sont :

- gonflement ou détérioration des matériaux,
- diminution de la résistance mécanique,
- grippage dû à la corrosion,
- corrosion galvanique des matériaux,
- perte d'élasticité,
- condensation,
- modification des caractéristiques thermiques et électriques des matériaux isolants,
- accélération des réactions chimiques et biologiques.

Lorsque l'air humide entre en contact avec du matériel ayant une température de surface en dessous du rosée de la condensation se produit. Si, par la suite suffisamment d'eau s'accumule sur la surface du matériel, il tend à se former, des gouttelettes qui en atteignant une taille suffisante, s'écoulent en goutte à goutte en surplomb des surfaces. La condensation sera plus prononcée lorsque les matériaux de surface sont de bons conducteurs thermiques, tels que les métaux ou le verre. Dans les climats froids, un nouveau risque pourrait résulter de la fonte du gel. En outre, des éléments non scellées, dont l'atmosphère interne est en contact avec l'air ambiant, soumis à un refroidissement avec une teneur en humidité de l'air suffisante, voient se produire de la condensation en leur sein. L'eau ainsi obtenue risque de ne pas être complètement expulsée à la suite d'une hausse ultérieure de la température.

Ce cycle plusieurs fois répété pourrait causer une accumulation progressive d'eau liquide à l'intérieur du matériel.

Ainsi les effets classiques provoqués par la présence d'eau liquide se retrouvent lorsqu'il y a condensation modification des caractéristiques thermiques et électriques des matériaux isolants, accélération des réactions chimiques et biologiques.

Les raisons pour pratiquer des essais à quantités variables de vapeur d'eau dans l'air reposent sur des constatations simples :

- l'eau est un solvant, sa vapeur condensée a un effet chimique sur les produits ou substances qui la "subissent" (corrosion, par exemple),
- l'eau modifie les propriétés mécaniques des substances : un carton mouillé est moins résistant qu'un carton sec,
- l'eau modifie les propriétés électriques des composants (variation de la constante diélectrique),
- l'eau, enfin, est le support de la vie, et sa présence dans un produit peut y favoriser le développement de micro-organismes, algues, bactéries, moisissures.

1.4.5 Diagramme des effets de l'humidité

La figure 4 indique les phénomènes physiques fondamentaux créés par les essais d'humidité et montre les relations entre ces phénomènes, les caractéristiques technologiques de construction des matériels ou les matériaux qu'ils contiennent et les effets de l'essai.

Les symboles correspondant aux paramètres d'essai, indiqués ci-dessous, ont été placés dans les différentes cases du diagramme lorsque cela semblait approprié ou lorsqu'on a estimé que les connaissances actuellement acquises le justifiaient.

- temps (durée totale de l'essai) : t
- température : T
- variation de température : ΔT
- vitesse de variation de température : dT/dt
- humidité relative : HR
- humidité absolue : HA
- degré d'impuretés de l'atmosphère d'essai : Pu

1.4.6 Notes explicatives

Méthode d'entrée

La case intitulée *pénétration* placée dans la deuxième ligne du diagramme indique toute opération par laquelle l'humidité relative traverse un scellement insuffisamment étanche, tel que revêtements, réservoirs, tuyaux, tubes, etc ...

Cette *case* peut ne pas s'appliquer aux matériels dans lesquels la surface extérieure est constituée par une partie du diélectrique ou de tout autre matériau fonctionnel du matériel : l'humidité attaque alors directement le matériel ou par plusieurs des processus fondamentaux indiqués à la troisième ligne.

Exemples d'effets

La dernière ligne donne quelques exemples typiques de ces effets et il faut bien préciser que ces exemples ne sont pas les seuls qui puissent résulter de ces phénomènes physiques.

Les *cases* de cette ligne ne devraient pas être considérées comme entièrement séparées puisque des interactions entre ces divers effets sont à la fois possibles et probables.

Cela est mentionné dans la quatrième case à partir de la gauche où des réactions chimiques entre l'humidité et les matériaux peuvent, comme il est indiqué, conduire à des variations de résistivité transversale, d'angle de pertes, etc. c'est une des relations les plus évidentes, mais il y en a sans aucun doute bien d'autres.

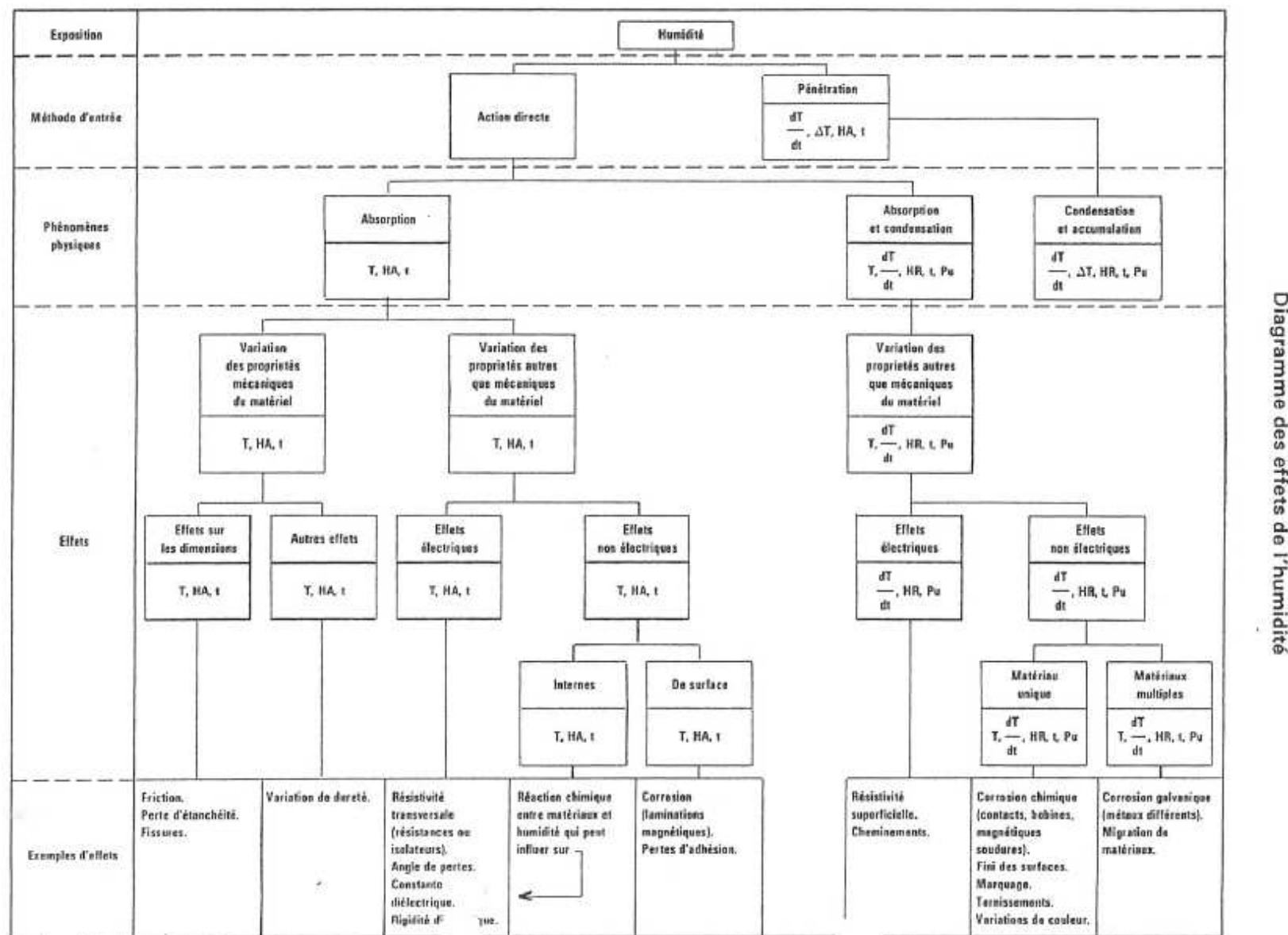


Figure 4 : Diagramme des effets de l'humidité

1.4.7 Procédures d'essais

Les essais cycliques de chaleur humide sont mieux adaptés à la mise en évidence des effets de la condensation et de la respiration.

Les essais en températures stabilisées sont mieux adaptés à la mise en évidence des effets liés aux phénomènes d'absorption.

1.5 Ruissellement

Généralement le terme ruissellement est désigné pour définir l'écoulement de l'eau sur la surface du globe. Le ruissellement désigne en hydrologie le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Il s'oppose au phénomène d'infiltration.

Dans le cas de ce document le ruissellement désigne l'écoulement de l'eau en provenance de la condensation, sur les surfaces du considéré.

A la différence de la pluie, le ruissellement faisant suite à de la condensation n'est pas accompagné d'une force de pénétration comme le vent peut l'infliger en cas de bourrasque.

De ce fait les chemins que peuvent parcourir des gouttes, livrées aux seules forces de la pesanteur et de l'état de surface sur lequel est sont présentes, peuvent être totalement différents de ceux suivis par la pluie.

On peut être étanche à la pluie mais pas automatiquement étanche au ruissellement.

1.6 Poussières

1.6.1 Classification des types d'événements vent de sable et poussières

Il faut faire attention à distinguer les tempêtes de sable (sandstorms) des tempêtes de poussières désertiques (dust storms). Elles diffèrent par la taille des particules mobilisées (0.2 mm pour quelques microns), la taille du nuage formé (2 m de haut pour plusieurs centaines de mètres) ainsi que de la durée de l'événement. La distance de visibilité est également un critère de distinction entre les deux phénomènes. De plus, si le nuage disparaît quand la vitesse du vent diminue, alors il s'agit d'une tempête de sable, de même qu'une tempête est dite sévère si la visibilité est inférieure à 200 m. Une visibilité inférieure à 1000 m est signe de tempête de sable ou de poussières mais ne dure que 1h à 4h30. Les tempêtes de poussières sont telles que la concentration de poussières reste importante (visibilité réduite) même si le vent a diminué en intensité et pour quantifier les flux de poussières, une étude de visibilité convertie en PM10 (particules de diamètres $< 10 \mu\text{m}$) est souvent utilisée. Une visibilité réduite à 100 m (1000 m) correspond à 7 % (0,35 %) de particule en suspension dans l'air (Alghamdi and Akyurt, 2001). Il est communément admis que les zones avec une forte activité de tempêtes de poussières se caractérisent par un taux annuel de précipitation entre 100 et 200 mm laissant une surface encroûtées et/ou un sol sec avec des matériaux libres en surface.

Dans les normes d'essais la poussière est définie par des particules de taille inférieures à $150 \mu\text{m}$ et le sable par des particules de tailles allant de 150 à $850 \mu\text{m}$.

1.6.2 Mécanismes de mise en mouvement du sable et de la poussière

Les tempêtes de sable et de poussières dépendent du stock disponible à la surface du sol (typologie, composition minéralogique, occupation du sol) mais également de la vitesse du vent (conditions météorologiques synoptiques).

Selon la force du vent celui-ci peut déloger et entraîner des particules de sable c'est la vitesse seuil de mobilisation en-deçà de laquelle rien ne bouge. Une fois qu'elles ont quittées le sol elles sont accélérées par le vent mais les forces de gravité les ramènent au sol où elles vont aller impacter les

autres particules à la surface. Ensuite, soit elles sont piégées soit elles vont libérer d'autres particules. Pour les tempêtes de sable, la mise en mouvement des particules au sol a lieu quand la vitesse à 30 cm au-dessus de la surface dépasse les 20 km/h (~ 5.6 m/s). Pratiquement tout le transport de sable est confiné dans les 50 premiers cm au-dessus du sol. Ce transport, ou flux horizontal, se fait selon deux modes bien connus que sont la reptation (25 %) où elles vont rouler au sol par impact et la saltation (75 %) où elles vont être extraites et rebondir. La taille des particules mobilisées est entre ~ 500 - $2000 \mu\text{m}$ pour la reptation et entre ~ 20 - $500 \mu\text{m}$ pour la saltation. Globalement il est reconnu que le flux horizontal est proportionnel à la vitesse du vent au cube mais qu'il dépend également du seuil d'érosion. La fréquence des événements de poussières est donc donnée par le nombre de cas où la vitesse du vent excède la vitesse seuil d'érosion alors que l'intensité dépend quand à elle de la valeur au-dessus du seuil. Autrement dit, si la vitesse du vent dépasse à peine la vitesse seuil de mobilisation, le flux est faible alors que s'il dépasse de beaucoup le flux de sable/poussières est plus important. Le flux horizontal est donc une relation complexe entre l'énergie cinétique des particules (donc granulométrie et nature minéralogique), la masse totale transportée, la vitesse des particules et les caractéristiques de la surface (rugosité, encroûtée, pourcentage de couvert végétal, nue avec matériel libre à la surface,...) et bien sûr la vitesse seuil d'érosion généralement notée u^*_{t} . A ces deux premiers modes de transport (reptation et saltation) qui concernent des particules relativement grosses ($>20 \mu\text{m}$), se rajoute un dernier mode concernant les granulométries inférieures à $20 \mu\text{m}$: il s'agit des mécanismes de mise en suspension de fines particules de poussières par les forces ascensionnelles du vent. Dans ce cas, la vitesse de chute des particules est inférieure à la portance du vent, et ces particules sont susceptibles d'être transportées sur de longues distances (plusieurs centaines de kilomètres).

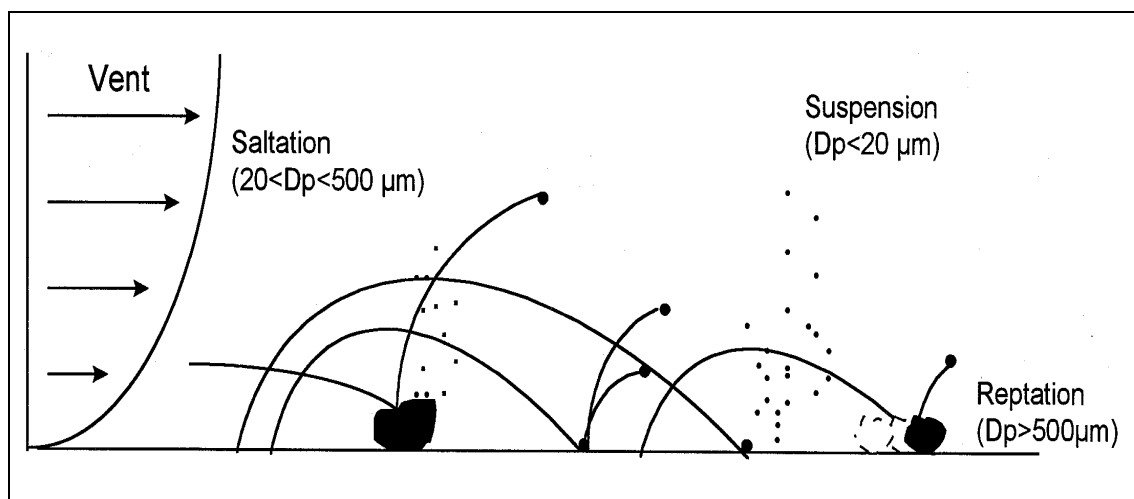


Figure 5 : Modes de transport des particules au sol sous l'action du vent selon leur taille (modifié d'après Pye, 1987).

On distingue ainsi différentes origines au transport de sable et poussières.

1.6.3 Transport par déplacement des dunes (sources proches)

La formation des dunes de sable est un sujet à part entière. L'étude de la morphologie des dunes et de leur dynamique date des travaux de Bagnol (1941). Depuis, de nombreuses études ont été menées sur leur formation et leur mode de déplacement en se basant sur les mesures de la forme, leur taille, leur vitesse ainsi que des problèmes de physique qu'elles posent comme la désertification. La dynamique des dunes est contrôlée par le transport de sable lui-même contrôlé par le vent et surtout du changement de direction des vents pendant l'année. Les plus connues sont celles en forme de croissant dite 'barkhanes'. Elles sont les formes les plus simples et donc les plus étudiées. Leur forme et leurs caractéristiques dépendent de la quantité de sable disponible et du

changement de direction du vent pendant l'année. Plus les vents sont constants dans une direction plus elles ont de chance de se former et de se déplacer. En moyenne elles sont hautes de 1.5 à 10 mètres, larges de 30 à 100 m et longues de 40 à 150 m (Saurenmann et al, 2000). Les "petites" dunes de 3 m de haut se déplaceraient de 15 à 60m/an avec un taux de renouvellement de 5 mois à 2 ans alors que les "grandes" de 15 m de haut environ de 4 à 15 m/an avec un renouvellement de 6 à 25 ans (Andreotti et al, 2002).

1.6.4 Transport par remobilisation de matériaux déposés ou érodés (sources proches)

Dans les déserts rocheux, l'accumulation de poussières peut être le résultat de l'érosion du sol mais également des dépôts de poussières mais dans tous les cas fortement influencé par la topographie du site. Selon la vitesse du vent mais surtout de la forme du relief (pentes raides ou non, concaves ou convexes) cette accumulation peut être très forte ou pratiquement nulle. Des mesures in-situ et en soufflerie du taux d'accumulation de particules indiquent que le maximum (minimum) d'accumulation a lieu sur des pentes au vent de forme concave (convexe) et dans une moindre mesure sur des pentes parallèles au vent. La plus faible accumulation est observée sur des pentes sous le vent. De plus il a été démontré qu'une très forte accumulation correspondait à un très haut taux de déposition et pas d'érosion des sols (cas rares) ; une forte accumulation correspondant soit à un fort dépôt et une érosion modérée (pentes au vent modérées) soit à un dépôt modéré et pas d'érosion (pentes parallèles au vent); une très faible accumulation quand il y a peu ou pas de dépôt et une forte érosion (pentes au vent convexes).

Une source de poussières est définie par la quantité de matériel libre à la surface du sol (ancien lac, rivières asséchées,...), par pas ou peu de pluie (zone aride), sécheresses fréquentes, vent fort, relief favorable. L'intensité d'une source est donc liée à la quantité de poussières émises par an. Cette quantité est estimée soit par des modèles de transport (Marticorena et Bergametti, 1995) soit par la charge/nature minérale atmosphérique (Goudie and Middleton, 2001), soit à partir des caractéristiques des matériaux à la surface (Callot et al, 2000).

La concentration de poussières avec la hauteur dépend de l'intensité de la tempête. Mais pendant les plus intenses, cette concentration semble constante avec la hauteur alors qu'elle reste variable pour les plus faibles. Les particules les plus grossières seront proches de la source et au fur et à mesure que l'on s'en éloigne seule la fraction fine est transportée. Cependant il arrive que des particules "géantes" de taille $> 62.5 \mu\text{m}$ soient retrouvées à plus de 3000 km des sources.

1.6.5 Transport éolien lointain (sources lointaines)

Une fraction du flux de saltation est mise en suspension pour être transportée sur de longue distance, c'est le flux vertical de poussières ($DP < 20 \mu\text{m}$). Quelques études ont été menées pour estimer ce rapport (Marticorena et Bergametti, 1995 ; Gillette et al, 1995 ; Sabre et al, 1997 ; Alghamdi and Akyurt, 2001). Cette fraction est issue généralement du "bombardement" des particules en saltation sur d'autres particules présentes à la surface du sol. C'est le processus de sandblasting (Gomes et al, 1990 ; Alfaro et al, 1997 ; Alfaro, 2008 ; Wang et al, 2008). Si le sol contient une fraction importante de fines particules les forces de cohésion sont renforcées et le profil de concentration de poussières est diminué car les particules de saltation ne sont pas libres ; dans le cas contraire, la fraction fine du sol est libérée. Selon la nature de la zone aride (désert, terres agricoles, lac salé asséché,...) la fraction fine du sol se présente soit en placage sur des grains de quartz, soit en liant dans des agrégats soit encore en agglomérats.

1.7 Grêle

1.7.1 Définition de la grêle

La définition qui est faite de la grêle est aussi vaste et floue que peut l'être le phénomène lui-même. En fait, cette définition a constamment évolué au cours du temps puisque jusqu'à une époque toute proche, hydrologues et météorologues avaient adopté des définitions différentes. De ce fait, il n'est pas facile de cerner avec précision la frontière entre la grêle et des phénomènes connexes tels que le grésil ou les granules de glace. Et ce, d'autant plus que leurs caractéristiques physiques sont proche

et difficilement identifiables en fonction des éléments extérieurs conjugués : vent, température, altitude du relief, etc. En effet, par forte température un grêlon partiellement fondu peut être confondu avec le grésil puisque c'est la dimension qui reste le critère le plus accessible pratiquement.

Voici la définition qu'en propose l'Organisation Météorologique Mondiale chargée de l'étude des nuages et des météores, publié dans l'Atlas International des Nuages (*éd. 1956*) :

Grêle : précipitation de globules ou morceaux de glace (grêlons) dont le diamètre est de l'ordre de 5 à 50 millimètres, parfois plus, et qui tombent, soit séparés les uns des autres, soit agglomérés en blocs irréguliers. Les grêlons sont constitués presque exclusivement par de la glace transparente ou par une série de couches de glace transparente d'au moins 1 mm d'épaisseur, alternant avec des couches translucides. Les chutes de grêle s'observent habituellement au cours de forts orages. " Formation de la grêle

La grêle est formée dans les nuages à grand développement vertical que sont les cumulo-nimbus. Les phénomènes qui régissent la formation et la croissance des grêlons sont de nature complexes [14]. Interviennent des aspects :

- De croissance cristalline à partir de particules glaçogènes agissant comme noyau de condensation, ainsi que des phénomènes de coalescence de grains,
- de thermodynamique : bilans énergétiques liés aux changements de phase liquide, solide et vapeur, ainsi qu'aux différences de pressions de vapeur saturante de la vapeur d'eau en équilibre avec sa phase liquide ou solide. Les mécanismes de surfusion sont également à prendre en compte,
- de dynamique : courants d'air verticaux importants, turbulence, installation de cellules convectives.
- de thermique : échanges convectifs avec l'air ambiant à température positive ou négative.

De manière simplifiée un cumulo-nimbus se forme, par exemple, lors d'une journée ensoleillée lorsque le sol réchauffe l'air à son voisinage. L'air chaud et humide s'élève alors en se condensant par détente et refroidissement dans les basses couches de l'atmosphère, plus froides. Cette condensation en phase liquide s'opère à partir de noyaux de condensation (poussières, impuretés ...) présentes dans l'air.

C'est le début de la phase de formation du nuage. La densité en fines gouttelettes (*diamètre moyen de l'ordre de 20 μm*) peut atteindre des valeurs de 200 gouttelettes/cm³. Ce phénomène de condensation libère une quantité d'énergie importante par le jeu de la chaleur latente de condensation de l'eau, et renforce ainsi les courants d'air ascendants et le développement vertical du nuage.

Dans sa phase pleinement développée, un cumulo-nimbus peut atteindre une hauteur verticale d'une dizaine de kilomètres, et peut grossièrement se diviser en trois zones, suivant la gamme de température régnant dans le nuage :

De la base du nuage jusqu'à l'isotherme 0 °C (à environ 3600 m d'altitude), on rencontre des gouttelettes d'eau en phase liquide, de diamètre moyen 20 μm , obtenues par croissance à partir d'un germe de condensation, puis par coalescence de gouttes au-delà.

De l'isotherme 0 °C à l'isotherme - 40 °C (à environ 9000 m), coexistent des gouttelettes d'eau liquide en surfusion et des particules de glace obtenues à partir de noyaux glaçogènes. C'est dans ce domaine que se forment les grêlons lorsque les valeurs des courants d'air ascendants dépassent environ 10 m/s (§ sur la vitesse terminale de chute des grêlons). Plus ces valeurs de vitesses sont fortes, plus le développement des grêlons est important.

Au-dessus de l'isotherme - 40 °C, seules subsistent des particules de glace.

La zone comprise entre l'isotherme 0 °C et - 40 °C est donc celle de formation des grêlons.

De manière plus précise, leur croissance se fait, ici, à partir de processus successifs :

- De 0 °c à – 40 °c, l'eau liquide existe sous forme surfondue. Ils sont présents, toutefois, à l'intérieur des nuages, des noyaux glaçogènes (sable, argile, bactéries, fumées industrielles) qui permettent la transition vers la phase solide. il est à noter que la teneur en particules de glace est très faible, comparée au nombre de gouttelettes liquide : environ 1 pour 100 000 à – 10 °c. Cette teneur augmente avec la diminution de température.
- Ensuite, jusqu'à des diamètres de l'ordre de 100 µm, les particules de glace grossissent par condensation directe de vapeur d'eau à leur surface, celle-ci provenant des gouttelettes d'eau liquide se vaporisant. Ce mécanisme s'explique par le fait que, à même température, la pression de vapeur saturante de l'eau sur la glace est plus faible que sur l'eau liquide. les particules de glace ne sont donc pas en équilibre thermodynamique avec leur environnement et se développent donc au détriment de gouttelettes liquides qui finissent par s'évaporer (temps de l'ordre d'une dizaine de minutes)
- jusqu'à des diamètres de l'ordre de quelques millimètres (stade de la neige roulée ou du grésil), le grêlon grossit alors par coalescence de gouttes. Deux alternatives peuvent, à ce niveau, se produire :
 - soit les ascendances ne sont pas suffisamment fortes et les particules de neige roulée ou de grésil retombent au sol, en se transformant souvent en pluie, si les niveaux de température en dessous de l'isotherme 0 °c et la distance par rapport au sol sont suffisants,
 - soit les courants d'air ascendants sont importants (≥ 10 m/s) et les particules de glace continuent leur ascension en grossissant par coalescence de gouttelettes surfondues, de grésil, de neige roulée ou éventuellement d'autres grêlons présentant un film liquide à leur surface, puis retombent vers le sol lorsque la vitesse du courant ascendant devient inférieure à la vitesse terminale de chute du grêlon.

Nota:

En fait, par le jeu des turbulences, de la présence de différentes cellules convectives et de variations temporelles des vitesses d'air, les grêlons peuvent parcourir différents aller-retour avec éventuellement fusion partielle et re-solidification avant de tomber sur le sol.

Les différents mécanismes de développement des grêlons et leurs interactions expliquent les variations de densité constatées ainsi que la variété des formes.

La figure 6 résume les différents aspects des précipitations d'hydrométéores (pluie, grésil, neige, neige roulée, grêle)

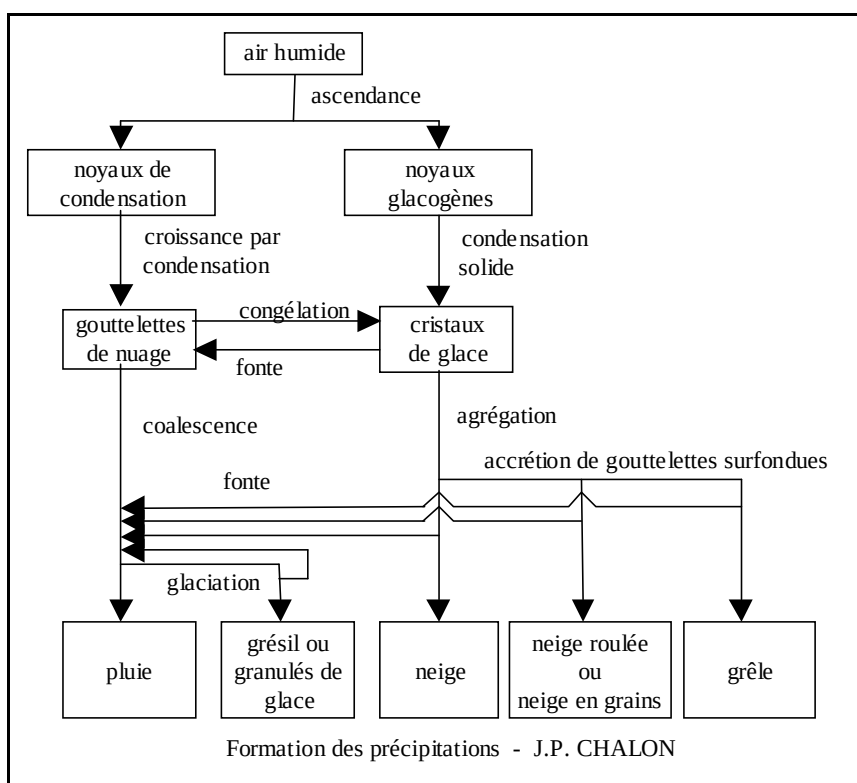


Figure 6 : Formation des précipitations

1.7.2 Caractéristiques des grêlons

1.7.2.1 Taille et forme des grêlons

Le "**National Weather Service American**" a établi une classification officielle des tailles de grêlons. Celle-ci se veut évidemment imagée pour permettre un jugement rapide de leur taille par les observateurs. Le tableau 5 donne cette classification ainsi que les vitesses moyennes de chute correspondantes.

Dénomination	Diamètre équivalent	Vitesse terminale de chute moyenne
Pois	0,6 cm	Environ 10 m/s (36 km/h)
Pièce de 1 penny	2 cm	Environ 16 m/s (60 km/h)
Pièce de ¼ dollar	2,5 cm	Environ 21 m/s (75 km/h)
Pièce de ½ dollar	3,2 cm	Environ 24 m/s (90 km/h)
Balle de golf	4.4 cm	Environ 28 m/s (100 km/h)
Balle de base-ball	7 cm	Environ 36 m/s (130 km/h)
Pamplemousse	10 cm	Environ 43 m/s (150 km/h)

Tableau 4 : Classification des grêlons et vitesse terminale de chute moyenne

Nota :

Lors d'un orage, il peut exister au niveau du sol des vents relativement violents. La vitesse d'impact est alors la résultante de la vitesse de chute et de la vitesse d'entraînement due au vent.

La taille des grêlons est celle mesurée lorsqu'ils arrivent au sol. Il ne faut pas confondre, non plus, la taille moyenne des grêlons lors d'une averse avec la taille maximale des grêlons observés durant le même événement, paramètre qui est le plus souvent cité car plus impressionnant.

Depuis un siècle, différentes observations ont permis de valider des tailles de grêlons allant jusqu'à 14 cm. Cette taille semble une limite qui s'expliquerait par un changement du régime d'écoulement au voisinage de cette valeur, engendrant une instabilité de la vitesse de chute [15]. Le record du monde dûment enregistré est un grêlon tombé le 3 mars 1970 à Coffeyville, Kansas : il avait un diamètre de 14 cm et pesait 760 g !

En raison des différents mécanismes de formation vus précédemment, les grêlons ont des formes géométriques variées. Certains auteurs [16] font même remarquer que lors de chutes de grêle, il n'est pas rare qu'une forme géométrique ne représente pas plus de 10% des formes générales des grêlons. Cependant, lorsqu'ils sont de petite taille, leurs formes sont plutôt sphériques ou coniques et présentent éventuellement des excroissances. Plus gros, ils ont des formes plus variées : sphériques, ellipsoïdales, aplaties, irrégulières (figure 7).

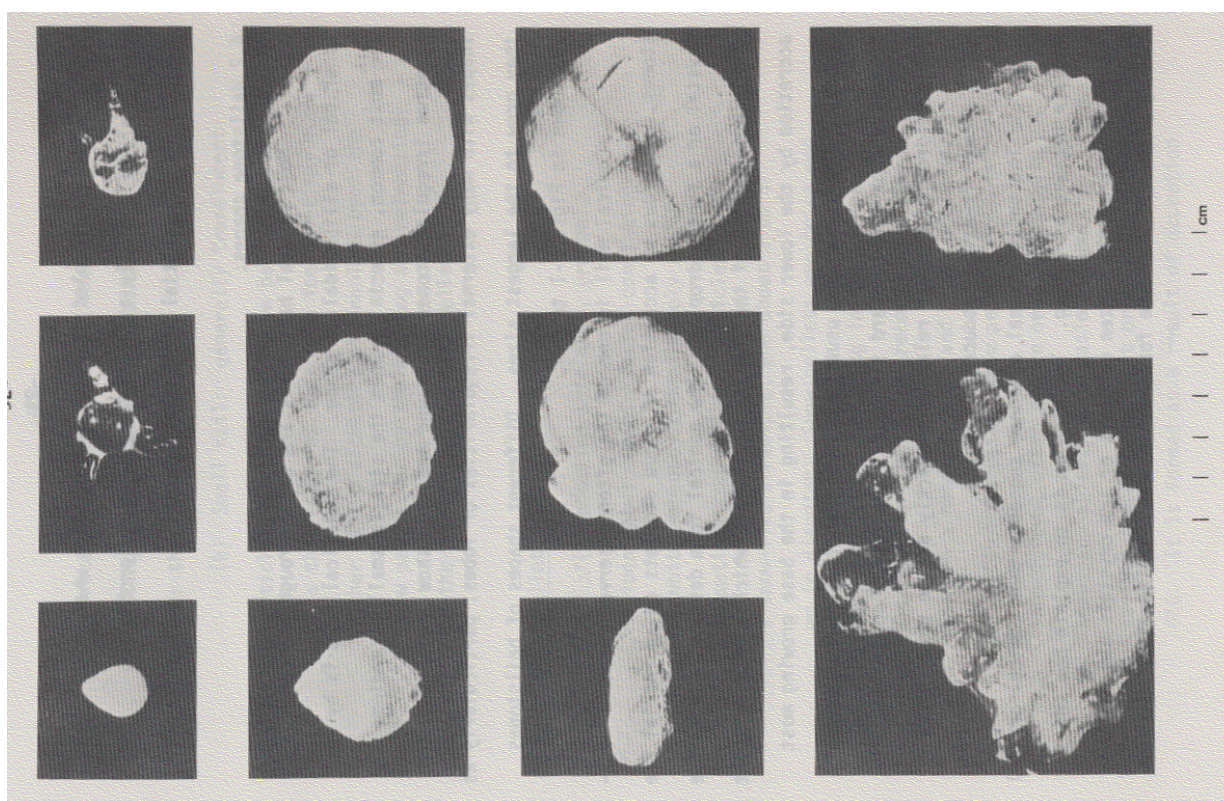


Figure 7 : Exemples de différentes formes de grêlons en fonction de leur grosseur ([15], d'après Carte and Kidder, 1970)

Les plus gros grêlons nécessitent pour leur formation des ascendances importantes, c'est-à-dire un air instable (humide). En ce sens, et puisque ces conditions d'instabilités sont également celles qui conditionnent l'apparition des orages, on admet que le nombre de jours d'orage (c'est-à-dire où l'on entend le tonnerre au sens de l'OMM) est sensiblement représentatif de la probabilité d'occurrence de la grêle en un lieu donné (à l'exception des tropiques, où des températures négatives n'apparaissent pas en dessous de 5 kilomètres d'altitude).

Les grêlons existent au niveau des océans, mais restent de dimensions inférieures (1,5 cm de diamètre) à ce que l'on peut rencontrer sur les continents, où le nombre moyen de jours de grêle est compris entre 5 et 10. Les occurrences les plus fortes de la grêle apparaissent aux latitudes moyennes et subéquatoriales, où elles peuvent atteindre 15 à 25 jours par an dans certaines régions côtières. Les grêlons sont rares dans les régions polaires et n'excèdent généralement pas 1 cm de

diamètre. L'occurrence de grêlons la plus importante est de 31 jours par an en moyenne aux îles Falkland.

TABLE 1
NUMBER OF HAILSTONES PER CUBIC METRE (AT ABOUT 4000 M LEVEL) FOR SPECIFIED
MAXIMUM HAILSTONE SIZE, AND FOR SPECIFIC RANGES OF STONE SIZE

Range of stone diameter (cm)	Size or largest stone (cm) in hailstorm		
	3	6	10
	Numbers per cubic metre		
0-1	22	9	7
1-2	0.8	0.35	0.27
2-3	0.17	0.07	0.06
3-4	-	0.03	0.02
4-5	-	0.01	0.01
5-6	-	0.0007	0.005
6-7	-	-	0.0003
7-8	-	-	0.002
8-9	-	-	0.0015
9-10	-	-	0.001
Equivalent rainfall (mm/hr)	250	300	500

Tableau 5 : Distribution de la taille des grêlons, d'après DEF STAN 00-35 (Part 4)/3, chapitre 7-01

1.7.2.2 Masse volumique et vitesse terminale de chute

La masse volumique d'un grêlon dépend de son type de formation. Si celui-ci est composé principalement de neige roulée ou de grésil avec beaucoup d'inclusions d'air, sa *masse volumique* peut descendre à des valeurs de 0,4 à 0,7 g/cm³. Dans les autres cas, elle atteint des valeurs de 0,85 à 0,92 g/cm³, proches de celle de la glace. Il est à noter, d'ailleurs, que dans ce cas, la dureté du grêlon est plus forte et donc ses effets mécaniques plus importants.

La vitesse terminale de chute d'un grêlon est évidemment un paramètre très important car elle conditionne avec la masse, l'énergie cinétique du grêlon au moment de son impact. Par contre c'est aussi la grandeur qui est la plus difficile à appréhender au cours d'une averse. Les études réalisées se sont en effet plus attachées à l'estimation de l'énergie cinétique à l'impact par l'étude de la déformation de matériaux calibrés placés sur site. Néanmoins des ordres de grandeurs de la vitesse terminale en fonction de la granulométrie des grêlons ont pu être dégagés [15] et [18].

D'un point de vue théorique, la vitesse verticale d'un grêlon est soumise à deux forces qui s'opposent : la gravité et la traînée. La force de gravité dépend de la masse, alors que la traînée dépend de la taille, de la forme ainsi que des propriétés des surfaces. La différence entre la force de gravité et la résistance à l'air est l'accélération du grêlon. La vitesse terminale de chute est atteinte lorsqu'il y a annulation de l'accélération même de l'objet. Il vient alors :

$$V_{term} = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_{grelon} \cdot g \cdot D}{3 \cdot \rho_{air} \cdot Cd}}$$

Avec : ρ_{grelon} : densité du grêlon

ρ_{air} : densité de l'air

D : diamètre équivalent du grêlon

Cd : coefficient de traînée

g : Accélération de la pesanteur = 9,81 m/s²

Au vu des incertitudes sur la masse volumique et sur la forme des grêlons, seul un ordre de grandeur des vitesses terminales en fonction du diamètre équivalent peut être donné (*Tableau 4*) [3]. Nous proposons ainsi une fourchette sur la vitesse terminale suivant la formule :

$$V_{\text{terminale}} \text{ (m/s)} = (13,5 \pm 3) \sqrt{d \text{ (cm)}}$$

Il faut enfin remarquer que les averses de grêle sont souvent associées à des vents importants qui viennent augmenter la vitesse d'impact.

Intensité

Les mesures expérimentales de l'intensité d'une averse de grêle sont relativement rares et donc leur analyse statistique délicate [14] et [17]. Néanmoins, les relevés effectués indiquent des valeurs de l'ordre de $1 \text{ kg/m}^2/\text{mn}$ pour des averses importantes, quelle que soit la grosseur des grêlons. Ramené à une pluviométrie équivalente, l'ordre de grandeur est donc de 60 mm/h , du même ordre qu'une averse orageuse de forte intensité [19].

Taille des grêlons

La fréquence d'occurrence d'une averse de grêle en fonction de sa granulométrie a été étudiée par plusieurs sources [14] et [15]. Le tableau 5 donne ainsi les fréquences d'occurrence pour la France métropolitaine. Les averses de grêle de *granulométrie 5 à 10 mm* sont de loin les plus fréquentes. Au-dessus de 30 mm , les événements deviennent extrêmement rares mais existent tout de même, comme l'indique la classification des tailles de grêlons (tableau 5).

Durée de l'averse

Les études effectuées, tant sur le plan mondial [2], que sur la France [3] concordent pour estimer que dans le plus grand nombre de cas, la durée varie *entre 5 et 15 mn*. Des averses de *plus de 30 mn* sont extrêmement rares et inexistantes pour des durées supérieures à 1 heure. Un tiers des averses durent *moins de 3 minutes*.

1.7.3 Effets

La sévérité de l'impact de la grêle sur un matériel étant liée à l'énergie cinétique des grêlons, il est important de garder à l'esprit que cette énergie cinétique est proportionnelle à la puissance

quatrième de leur diamètre, soit sensiblement : $E_c \text{ (J)} = 0,63 \times \phi \text{ (cm)}^4$ associée à une vitesse

d'impact $V_{\text{terminale}} \text{ (m/s)} = (13,5 \pm 3) \sqrt{d \text{ (cm)}}$ pour une masse volumique de $0,9 \text{ g/cm}^3$.

Dans le cas de véhicules en mouvement, la composition des vitesses doit être appliquée.

Les effets principaux de la grêle sont bien connus. Les trois principaux sont les suivants:

- Effets mécaniques dus aux impacts: destruction ou détérioration de toiture, d'éléments de construction, de dispositifs et d'engins,et bien évidemment des cultures et d'espaces végétaux,
- Effets mécaniques dus aux charges: affaissement ou destruction de toitures favorisant les accumulations (toitures terrasses, acrotères...)
- Pertes d'étanchéité lors de la fonte des grêlons si le niveau de grêlons montent au-dessus des relevés d'étanchéité.

1.8 Boue (projection)

Bien que non listé dans les normes, cette contrainte peut être néfaste au bon fonctionnement du matériel. Sa prise en compte doit être systématique pour des matériels terrestres mobiles.

L'aspect de capacité de mobilité n'est pas pris en compte dans cette description.

1.8.1 Définitions

En sédimentologie, la boue est un mélange d'eau et de particules sédimentaires fines de limons et d'argiles.

Lors des déplacements en terrain non stabilisé, hors piste, ou spécifique: carrière, zone de terrassement, le porteur peut projeter des paquets de boue pouvant être néfaste à lui-même et à ceux qui le suivent.

1.8.2 Effets

Ces paquets de boue peuvent obstruer des orifices de refroidissement, bloquer (tout ou en partie) des déplacements de biellettes ou autres parties mobiles, et de part leur présence nécessiter un nettoyage provoquant ainsi une perte de temps pouvant être néfaste à la mission : temps de mise en œuvre d'un système.

1.9 Micro-organismes

1.9.1 Rappel

Le fascicule 13 de la GAM-EG-13 définit deux types d'essais correspondant à deux types d'actions des moisissures :

- L'essai A (essai de comestibilité ou essai de croissance) permet de tester la résistance d'un matériel à l'action des moisissures et de contrôler la non-comestibilité des éléments constitutifs,
- L'essai B (essai d'envahissement ou essai d'effet fongistatique) permet d'évaluer l'efficacité des protections ou des revêtements antifongiques et le comportement d'un matériel dans un environnement à haut risques de moisissures.

1.9.2 Remarques

Un matériel est dit comestible s'il contient des éléments nutritifs ou qui permettent la vie et la prolifération des moisissures.

Un matériel est protégé lorsqu'il contient dans sa matière ou dans ses revêtements des agents antifongiques. L'efficacité de tels systèmes de protection peut d'ailleurs décroître dans le temps.

Deux comportements peuvent être suivis dans l'essai aux moisissures :

- Le développement de moisissures sur le matériel testé,
- L'action de ces moisissures sur le comportement opérationnel du matériel.

Contrairement aux autres essais en environnement climatique, les essais de bio détérioration mettent en œuvre des moyens d'essais vivants.

Dans le cas d'essais de biodégradation par action de moisissures, il s'agit de spores appelées à germer et à se développer dans des conditions propices de température et d'humidité, aux dépens du matériel à essayer, si celui-ci est comestible et/ou non protégé.

Les essais de moisissures requièrent des techniques et des précautions particulières. Ils ne peuvent être réalisés que dans des laboratoires spécialisés, par un personnel qualifié en microbiologie, ce qui constitue la meilleure garantie quand à la reproductibilité des essais et à l'interprétation des résultats.

1.9.3 Sensibilité des matériaux

Papier (étiquette, filtres, emballages):

La cellulose est un substrat particulièrement dégradable par les moisissures. Les effets généralement observés vont des tâches et décoloration jusqu'à la désintégration du papier. Ils entraînent l'altération des marquages, la perte partielle ou totale des caractéristiques fonctionnelles.

Peintures et vernis :

Ces produits sont formés de mélanges d'huiles, de dérivés de la cellulose, de solvants, de matières plastiques qui sont susceptibles d'être attaqués.

La responsabilité des peintures ou vernis dans les attaques dépend du type de substance et de la surface sur laquelle ils sont placés. Les conditions climatiques sont également un facteur déterminant (humidité, exposition au rayonnement solaire...).

Fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont ordinairement très sensibles aux attaques et doivent être protégées, sauf la laine et la soie. L'amiante qui est d'origine minérale est naturellement résistante.

Fibres synthétiques :

Les fibres synthétiques (acétate de cellulose, polyamide, polyester, polyacrylonitrile, polyvinylidène, acétate de copolymères...) ont une meilleure résistance que les fibres d'origine naturelle. Ils sont parfois totalement inertes.

Textiles :

Les textiles sont composés de fibre et parfois de revêtement ou d'enduction. Les attaques de micro-organismes peuvent provoquer des décolorations et des pertes de caractéristiques mécaniques ou physiques. Leur comportement s'associe à celui des fibres ou des matières plastiques.

Bien que protégés ou naturellement inertes, certains textiles (étoffes, cordes) peuvent, par les impuretés et les salissures qu'ils fixent, se révéler propices au développement des moisissures.

Matières Plastiques

Les plastiques sont diversement résistants. Cette résistance dépend de la nature et du taux des adjuvants (plastifiants, pigments, agents UV) entrant au développement des moisissures.

Cuirs (étuis, courroies, attaches)

Les cuirs tannés au chrome sont les plus résistants. La prolifération des moisissures entraîne l'altération de l'aspect, la perte de la souplesse ou de l'imperméabilité.

Les graisses, huiles et émulsions employées pour leur traitement peuvent être la cause des dommages.

Caoutchouc (joint, soufflets, durites).

Les caoutchoucs synthétiques sont très résistants, sauf sous des climats très humides. Le caoutchouc naturel est facilement dégradé par un grand nombre de moisissures.

Produits pétroliers (carburateurs)

La dégradation des carburants doit être signalée. De nombreuses espèces de micro-organismes peuvent se développer à partir du kérosène et de la faible quantité d'eau libre présente dans tout solvant organique et de l'oxygène dissous avec pour conséquences la corrosion des réservoirs structuraux, le colmatage des filtres...

Matériaux inorganiques (métalliques- réfractaires)

L'acier, l'aluminium et même les matériaux à base de cuivre ou d'arsenic ainsi que le verre, ne résistent pas à l'action de certaines moisissures dans des conditions climatiques appropriées.

1.10 Vent**1.10.1 Généralités**

Pour une altitude supérieure à plusieurs centaines de mètres, la vitesse du vent résulte de l'équilibre des forces de Coriolis engendrées par la rotation de la terre et des forces créées par le champ de pression atmosphérique. Le vent est alors sensiblement parallèle aux isobares et sa turbulence est presque nulle.

Pour une altitude inférieure à *1000 mètres environ*, là où se trouvent les ouvrages bâtis, les forces de frottement dues à la rugosité du sol et les phénomènes thermiques deviennent prépondérantes vis à vis des forces de Coriolis ; ils engendrent des fluctuations de la vitesse du vent, dans le temps et dans l'espace, susceptibles d'exciter les structures les plus souples. Cette zone est couramment nommée couche limite turbulente atmosphérique.

Toutes les constructions, même les plus élevées, sont soumises à l'effet de la turbulence.

Au plus près du sol, les forces de frottement sont très importantes, la vitesse moyenne du vent est faible et la turbulence élevée. L'altitude augmentant, la vitesse moyenne du vent augmente alors que sa turbulence décroît.

Un enregistrement des variations temporelles de la vitesse du vent montrerait que le vent est un phénomène très variable et très irrégulier. Ce caractère aléatoire est désigné sous le vocable de turbulence. Dans les basses couches de l'atmosphère, la turbulence est principalement générée par les obstacles de toutes natures qui forment la surface du sol et par les instabilités de l'écoulement d'origine thermique. Elle a tendance à décroître avec la hauteur.

L'échelle des vitesses du vent a été graduée en "*forces*" au cours d'un congrès international qui s'est tenu *en 1946*. Les mesures sont effectuées à une hauteur de *10 m* et classées selon une échelle de forces appelée "**échelle de BEAUFORT**" du nom de l'amiral anglais qui la définit le premier *en 1806* sur la base des vitesses des vaisseaux de lignes. Le tableau 6 donne pour les différentes forces, les vitesses correspondantes en plusieurs unités.

<i>Force</i>	<i>Désignation</i>	<i>Vitesse en Nœuds</i>	<i>Vitesse en km/h</i>	<i>Vitesse en m/s</i>	<i>Pression dynamique moyenne (Pa)</i>
0	<i>Calme</i>	0-1	0,5-1,5	0-0,2	0
1	<i>Très légère brise</i>	1-3	1,6-5	0,3-1,5	0,490
2	<i>Légère brise</i>	4-6	6-11	1,6-3,3	3,92
3	<i>Petite brise</i>	7-10	12-19	3,4-5,4	11,8
4	<i>Jolie brise</i>	11-16	20-28	5,5-7,9	28,4
5	<i>Bonne brise</i>	17-21	29-38	8-10,7	52,9
6	<i>Vent Frais</i>	22-27	39-49	10,8-13,8	93,2
7	<i>Grand frais</i>	28-33	50-61	13,9-17,1	149
8	<i>Coup de vent</i>	34-40	62-74	17,2-20,7	224
9	<i>Fort coup de vent</i>	41-47	75-88	20,8-24,4	316
10	<i>Tempête</i>	48-55	89-102	24,5-28,4	433
11	<i>Violente Tempête</i>	56-63	103-117	28,5-32,6	576
12	<i>Ouragan</i>	64-71	118-133	32,7-36,9	757

Tableau 6 : Echelle de Beaufort, échelle des forces du vent

1.10.2 Modélisation du vent

La vitesse du vent doit être analysée à l'aide d'une approche statistique dont la principale hypothèse est : la vitesse du vent est décomposable en une partie moyenne et une partie fluctuante aléatoire soit, pour la composante selon l'axe Ox porté par le vent moyen :

$$u(t) = \bar{u} + u'(t)$$

où $u(t)$ est la vitesse instantanée, $\bar{u}$ la vitesse moyenne; $u'(t)$ la partie fluctuante.

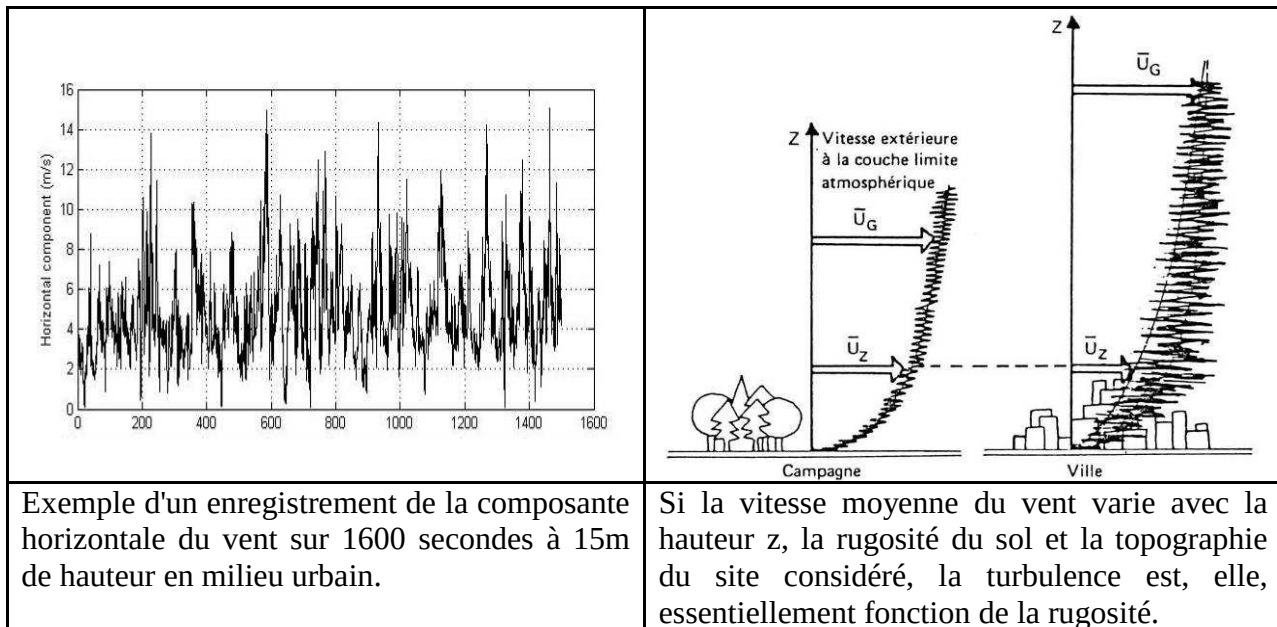


Figure 8 : Modélisation du vent

La vitesse moyenne du vent est une fonction logarithmique de la hauteur au-dessus du sol. Un site exposé aux vents forts nous autorise à négliger tous les effets d'une stratification thermique non neutre sur la vitesse du vent. Elle s'écrit alors :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)$$

où u_* est la vitesse de friction (m/s); k le coefficient de von Karman (0.4) et Z_0 la hauteur de rugosité (m) de 0.0005m (mer calme) à 2m (mégapoles/forêt tropicale).

En fonction des conditions de rugosité et de hauteur la vitesse maximale du vent est de l'ordre de 1.3 fois (faible rugosité, grande hauteur) à 2 fois (forte rugosité, faible hauteur) la vitesse moyenne du vent.

L'intensité de la turbulence est définie pour chaque composante par le rapport entre l'écart

quadratique moyen et la vitesse moyenne du vent à la même hauteur : $I_i = \frac{\sigma_i}{\bar{u}}$

A l'aide des expressions précédentes de $\frac{\sigma_i}{u_*}$ et de $\bar{u}(z)$ on obtient par exemple pour la composante

longitudinale la relation : $I_u = \frac{f(z_0)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$

qui traduit un accroissement de l'intensité de la turbulence avec la rugosité et une décroissance avec la hauteur au-dessus du sol.

La connaissance de l'intensité de turbulence permet aussi d'avoir une bonne estimation statistique de la vitesse maximale $\hat{U}$ (vitesse de pointe ou de rafale) sur l'échantillon de 10 minutes considéré :

$$\hat{U} = \bar{U} \sqrt{1 + 7 I_u}$$

où $\bar{U}$ est la vitesse moyenne du vent (m/s); $\hat{U}$ est la vitesse de pointe du vent (m/s) et I_u l'intensité de turbulence $\left(\frac{\sigma_u}{\bar{u}} \right)$; le rapport $G = \frac{\hat{U}}{\bar{U}}$ définit le facteur de rafale

Cette intensité de turbulence varie en fonction de la nature du terrain et de la hauteur par rapport au sol, classiquement entre 0.15 (terrain plat) et 0.40 (zone urbaine) pour $z < 50$ m. Ceci conduit à des facteurs de rafale de 1,43 à 1,95. Toutefois ce facteur de rafale peut atteindre des valeurs deux fois plus importante en fonction de la nature du site et de l'environnement complexe. Une valeur de 1,54 est généralement utilisée en l'absence de mesures.

1.10.3 Distribution des vitesses de vent sur un site

La vitesse et la direction du vent sont généralement moyennées sur 10 minutes et enregistrées toutes les 3 heures dans les stations de **Météo France**. La distribution statistique de ces valeurs au cours d'une période pluriannuelle est la résultante, au sol, des vents géostrophiques correspondant aux différents types de temps qui peuvent se produire au-dessus de la région et des effets de bise locaux. Cette distribution du vecteur vent moyen est souvent représentée sous la forme d'une rose des vents à 12 ou 18 directions (par secteur de 30° ou 20°) dont la longueur des branches est proportionnelle à la fréquence de la direction du vent, pour différentes classes de vitesse (voir figure 9 gauche).

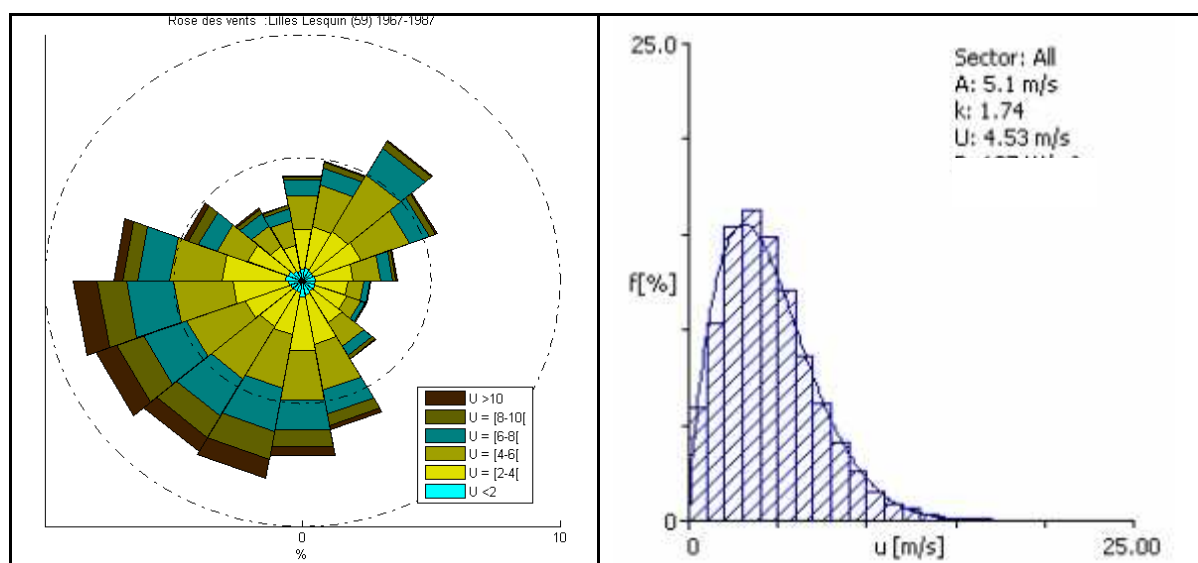


Figure 9 : Distribution du vecteur vent moyen

Cette présentation permet de mettre en évidence les "vents dominants" d'une station, c'est-à-dire les vents dont les directions sont les plus fréquentes.

Il est également possible de représenter la distribution de fréquence des vitesses moyennes de vent, toutes directions confondues ou pour un secteur de direction donné, en fonction de classes de vitesses, à l'aide d'un histogramme (voir figure droite). Dans le cas présent, une loi de densité de probabilité de Weibull $f(\bar{u})$ est ajustée à cet histogramme.

Cette loi s'écrit :

$$f(\bar{u}) = \frac{K}{\bar{u}} \cdot \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^K \cdot \exp \left(- \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^K \right)$$

où $\bar{u}$ est la vitesse moyenne du vent (m/s); A un paramètre d'échelle (m/s) et K un paramètre de forme (sans dimension), liés au site de mesure.

1.10.4 Densité spectrale

Les échelles de turbulence fournissent une image dimensionnelle de la turbulence en caractérisant l'importance spatiale des tourbillons.

Les échelles longitudinales L_i^x (x pour longitudinal et i pour la composante de la vitesse) peuvent être calculées à partir des fonctions d'auto corrélation $R_i(0, \Delta t)$ en un point par un ajustement d'une exponentielle décroissante sur cette fonction :

$$R_i(0, \Delta t) = e^{-\frac{\Delta t}{T_i}} \text{ avec } L_i^x = \bar{U} \cdot T_i \text{ où les } T_i \text{ sont les échelles de temps}$$

Les échelles longitudinales L_i^x augmentent avec la hauteur mais diminuent avec la rugosité.

Par exemple, à 10m de hauteur, en rase campagne on a :

$$L_u^x = 134 \text{ m}; L_v^x = 40 \text{ m}; L_w^x = 7 \text{ m} \text{ pour les échelles longitudinales.}$$

Les échelles latérale L_i^y et verticale L_i^z de la composante i de la vitesse fluctuante sont obtenues à partir des fonctions d'inter corrélations entre les anémomètres disposés à une distance Δr entre eux et prises le long de la même verticale ($\Delta r = \Delta y$ et $\Delta r = \Delta z$). Ces échelles sont obtenues à partir d'une loi exponentielle s'ajustant sur les fonctions d'inter corrélations :

$$R_i(\Delta r, 0) = \exp\left(-\frac{\Delta r}{L_i^r}\right)$$

Par exemple, à 10m de hauteur, en rase campagne on a :

$$L_u^y = 58 \text{ m}; L_v^y = 20 \text{ m}; L_w^y = 7 \text{ m} \text{ et } L_u^z = 46 \text{ m}; L_v^z = 30 \text{ m}$$

Les effets de la turbulence sont caractérisés par des fonctions de densité spectrale. En effet, lorsque les effets dynamiques "résonants" (excitation des modes propres de la construction par la turbulence) ne sont plus négligeables (grandes constructions élancées), il faut considérer les densités spectrales et les fonctions de cohérence de la turbulence.

Par exemple : la densité spectrale d'une composante de la turbulence est reliée à l'écart type de

cette composante :

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(n) \cdot dn$$

Cette densité spectrale est fonction de la hauteur et de la rugosité. La gamme de fluctuation du vent en vraie grandeur s'étend *du continu à quelques Hertz*. L'excitation du mode propre d'une construction à la fréquence n_0 sera d'autant plus forte que le contenu spectral du vent à cette fréquence, $S_u(n_0)$ sera grand.

Il existe de nombreuses formulations de la densité spectrale du vent. L'une des plus utilisée est celle de Von Karman dans la gamme de fréquence : $0,007 \leq n \leq 1 \text{ Hz}$

$$\frac{n S_u (n)}{\sigma_u^2} = \frac{4 f_u}{\left(1 + 70,8 f_u^2\right)^{5/6}}$$

$$\text{avec } f_u = \frac{n l_u^x (n)}{u(z)}$$

L_u^x (Donnée expérimentale) est une nouvelle expression de l'échelle longitudinale de la composante longitudinale de la vitesse du vent dont on obtient la valeur en ajustant la fonction de Von Karman au spectre expérimental. En rase campagne, il a été observé que $l_u^x \approx 0,5 L_u^x$

La connaissance de cette densité spectrale permet d'envisager le comportement dynamique des structures, de définir les caractéristiques de la structure turbulente du vent et d'effectuer un calcul pour le dimensionnement au vent des ouvrages d'art.

1.10.5 Effets statiques ou quasi-statique

La grande majorité des structures, constructions usuelles et dispositifs particuliers ont des déplacements négligeables sous l'action du vent et peuvent donc être considérées comme raides. La structure développe alors des forces résistantes qui, à chaque instant, s'opposent exactement aux forces aérodynamiques. Le dimensionnement au vent consiste alors à estimer les actions globales et locales induites par les pressions aérodynamiques qui s'appliquent sur la « peau » de la structure en vue de son dimensionnement, afin d'assurer sa pérennité (absence de rupture de pièces, d'arrachement d'élément, de renversement...).

1.10.6 Effets dynamiques

Les structures particulières (bâtiments élancés, ponts, antennes, mâts) sont de plus en plus élancées et légères, on peut alors observer des déplacements importants de celles-ci (quelquefois supérieurs au mètre pour les mâts et très grands ponts) avec un caractère vibratoire marqué : la construction présente un comportement dynamique en répondant selon ses modes de vibration. Les systèmes roulants placés sur suspension et amortisseurs peuvent être excités par le vent et ont donc également une réponse dynamique. Cette participation dynamique observée sur les constructions "souples" s'ajoute aux effets statiques et quasi-statiques considérés ci-dessus. Dans les cas extrêmes, elle peut représenter l'essentiel de la réponse avec des déplacements des structures quasi-sinusoïdaux : ce sont bien sûr des situations que l'on cherche à éviter. Pour les constructions "souples", les forces d'inertie ne sont plus négligeables et doivent être considérées dans l'étude de la structure.

1.10.7 Effets thermiques

Les effets thermiques se manifestent par le biais des échanges convectifs aux parois qui augmentent en fonction de la vitesse du vent. D'autre part, le vent peut augmenter les transferts d'humidité relative entre un matériau et l'air extérieur (exemple : évaporation humaine). Ces transferts retardent également les effets de la corrosion.

1.11 Pluie

1.11.1 Généralités

Sont dénommées précipitations, toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un

changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. L'apparition de la pluie nécessite la présence de vapeur d'eau dans l'air, qui doit se condenser dans un premier temps pour former les nuages, puis se transformer en gouttes de pluie. Cette condensation a lieu généralement par refroidissement d'une masse d'air humide. Ce refroidissement est généralement entraîné par un mouvement ascendant de certaines masses d'air, il peut être créé de manières différentes : par simple *convection naturelle*, par la présence d'une *barrière topographique* ou par la *formation d'un front dépressionnaire*. Après condensation, les gouttelettes composant le nuage restent généralement supportées par les mouvements ascendants de l'air dans les nuages.

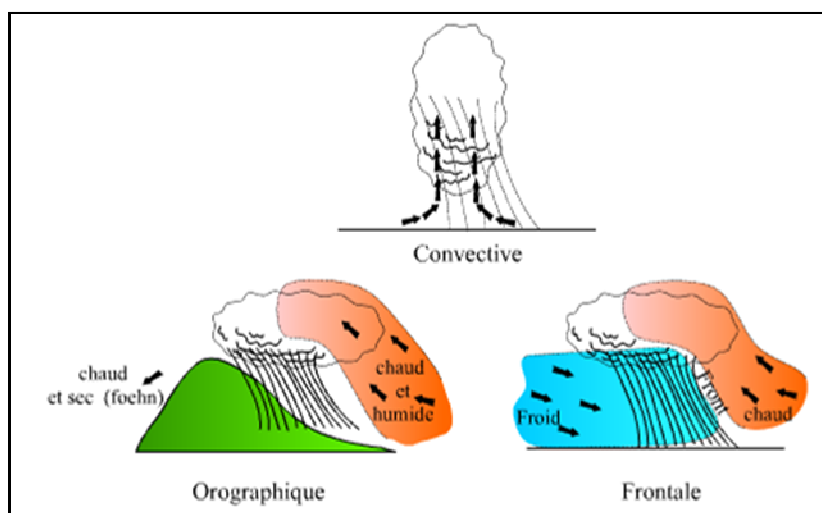


Figure 10 : Principaux types de précipitations : convectives, orographiques et frontales

Deux mécanismes de natures différentes permettent aux nuages de se transformer en pluie si les conditions sont favorables. Le premier mécanisme de formation de pluie est le processus de collision entre particules en mouvement dans le nuage. Le processus de **Bergeron-Findeisen** apparaît dans les nuages où coexistent particules de glaces et eau surfondue à des températures comprises entre -40°C et 0°C .

Les gouttelettes qui constituent les nuages ont un diamètre généralement compris entre 10 et $25\mu\text{m}$ et les gouttes de pluie sont d'échelle différente et leur diamètre s'échelonne d'ordinaire entre $500\mu\text{m}$ et 3mm .

La formation de précipitation découle donc du simple déplacement d'une masse d'air chaud et humide en altitude ou de la rencontre de masses d'air à température et humidité différente. Dans ce dernier cas, ces mouvements sont liés à la circulation générale de l'atmosphère autour du globe.

Les précipitations de type cyclonique résultent de la circulation de l'atmosphère à méso ou macro-échelle. Ce sont les perturbations dues aux dépressions frontales des latitudes tempérées, les dépressions de petite échelle ainsi que les dépressions tropicales et les cyclones.

Un cas particulier est celui des précipitations convectives et orographiques. Les précipitations convectives sont le résultat d'un mouvement ascendant rapide de l'atmosphère à petite et moyenne échelle de l'ordre de 10 à 100km^2 . La convection à l'origine des précipitations est naturelle ou forcée par les conditions géographiques locales, zones côtières, urbaines ou de relief important. Les précipitations orographiques sont créées par le mouvement advectif de l'air au contact d'une barrière orographique. Elles présentent des intensités moins élevées que les précipitations convectives.

1.11.2 Définitions

1.11.2.1 Distribution du diamètre de goutte

Un certain nombre de paramètres descriptifs des précipitations peuvent être calculés à l'aide des moments d'ordre p de la distribution des tailles de gouttes (communément appelée spectre de

gouttes). Le diamètre D des gouttes est exprimé en mm. Il existe plusieurs formulations du spectre de taille des gouttes. Par exemple sous forme exponentielle :

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}$$

$N(D)$ est le nombre de gouttes pour un diamètre D , par millimètre de diamètre et par m^3 d'air. Deux paramètres définissent ainsi la distribution de tailles de gouttes N_0 et Λ . Ils peuvent être calculés à partir de relations empiriques comme par exemple en fonction de l'intensité de précipitation (R en mm/h) :

$$N_0 = 5,1 \cdot 10^{-3} \cdot R^{-0,03} \text{ et } \Lambda = 4,1 \cdot R^{0,21}$$

Statistique des événements extrêmes : relation intensité-durée

Des relations entre l'intensité et la durée d'un épisode de pluie peuvent être déterminées pour les événements extrêmes. A partir des valeurs maximales des intensités moyennes (sur une durée T donnée : 6 minutes à 12 heures), au cours d'un intervalle de temps donné (mois, saison ou année) observées sur une série chronologique d'événements pluvieux, on peut déterminer, par une analyse statistique des événements extrêmes, les durées de retour probable d'un événement d'intensité et de durée donnée. Sur une durée limitée inférieure à 3h, une loi en puissance peut exprimer cette relation intensité-durée connue sous le nom de **formule de Montana** :

$$I = \alpha t^\beta$$

t est exprimé en minute et I en mm/min.

Les valeurs α et β , proposées comme référence normative par exemple pour la France divisée en 3 zones, sont fournies dans le tableau 7 :

Durée de retour		1 an	2 ans	5 ans	10 ans
Région I	α	3.1	3.7	5.0	5.9
	β	-0.64	-0.62	-0.61	-0.59
Région II	α	3.5	4.6	5.5	6.7
	β	-0.62	-0.62	-0.57	-0.55
Région III	α	3.8	5.0	5.9	6.1
	β	-0.53	-0.54	-0.51	-0.44

Tableau 7 : Valeurs α et β de la formule de Montana pour la France

Ces lois permettant d'établir les relations entre les intensités, la durée et la fréquence d'apparition des pluies peuvent être représentées selon des courbes caractéristiques : on parle généralement de courbes intensité-durée-fréquence (IDF voir figure 11). La notion de fréquence est en fait exprimée par la notion de temps de retour.

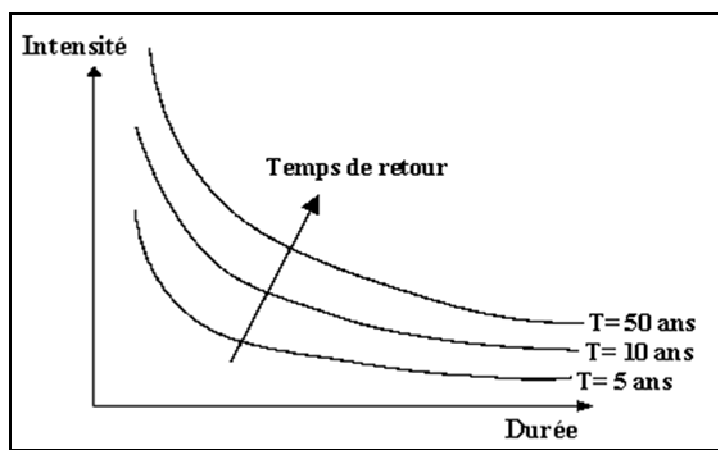


Figure 11 : *Courbes intensité-durée-fréquence (IDF)*

1.11.2.2 Etendue horizontale des évènements pluvieux

Intensités inférieures à 2 mm/h

Les zones de pluie correspondant à ces faibles intensités sont fréquemment de vastes étendues (*couramment 1000 à 1500 km par 300 km*). Dans certains cas extrêmes la longueur de la ceinture de pluie peut s'étendre jusqu'à 6000 km. Ce type de précipitations peut également se produire sur tout le côté des chaînes de montagnes exposé au vent (côtes Atlantiques en Grande-Bretagne et en Norvège, côtes Pacifiques aux Etats unis, chaînes montagneuses d'Asie au moment des moussons).

Taux de précipitation de 2 à 10 mm/h

Dans les climats tempérés, il y a peu de risques que des précipitations de 2 à 10 mm/h dépassent 250 km de longueur. On peut avoir assez couramment des longueurs de 150 à 250 km. A des latitudes tropicales, des ceintures de pluie répondant à un tel taux de précipitations peuvent avoir une longueur de 300 km ou plus dans le cas des ouragans. Les pluies de moussons en Inde et Afrique Occidentale couvrent fréquemment des longueurs de 1000 km, et des longueurs de 2000 km ont même été dépassées parfois au cours des moussons d'été sur les versants sud et ouest de l'Himalaya.

Taux de précipitations de 10 à 25 mm/h

Des précipitations de 10 à 25 mm/h sont presque toujours associées à une convection. Un nuage de convection fait rarement *plus de 15 km* mais il arrive parfois, par exemple le long d'un front froid, que les nuages soient plus étroitement liés et forment une *ceinture de pluie de 150 à 250 km* de longueur même si la *largeur ne dépasse généralement pas 15 km*.

On peut également avoir des regroupements similaires le long d'une barrière montagneuse et, pendant la phase la plus intense de la mousson tropicale d'été, on peut avoir des précipitations de cette intensité pratiquement partout sur les *versants sud et ouest de l'Himalaya* et sur les *franges associées sur 2000 km ou plus*. On peut également avoir des pluies de moussons de cette intensité en Afrique et en *Inde Occidentale*, sur des *zones de quelque 1000 km*.

On peut enfin observer de fortes pluies de ce type sur une *zone possible de 300 km* avec des ouragans tropicaux.

Taux de précipitations de plus de 25 mm/h

On estime que des précipitations d'une telle intensité se limitent partout à une ou deux cellules de convection avoisinantes. L'étendue horizontale de ces cellules est généralement dans la *plage de 1 à 5 km*, et ne dépasse normalement pas 30 km, même dans les tempêtes tropicales. Au cœur de ces cellules, pour des *diamètres de 2 km* ou moins, les taux de précipitations vont occasionnellement dépasser 100 mm/h, même dans les climats tempérés.

1.11.3 **Effets de la pluie**

Pour les bâtiments et les équipements, les principaux effets concernent la perte d'étanchéité et la corrosion. Les impacts des gouttes de pluie peuvent également engendrer des mécanismes d'érosion sur les matériaux, entraîner la destruction de revêtements de protection et provoquer un lessivage des agents d'imprégnation et de conservation.

Les effets les plus connus sont les suivants:

- perte d'étanchéité
- modification des échanges thermiques
- perte de visibilité
- dysfonctionnement du matériel électrique
- atténuation de la propagation des ondes électromagnétiques

1.12 Jet d'eau

1.12.1 Définitions

La sollicitation générée par un jet d'eau se différencie de la pluie par le fait qu'elle est associée à une projection d'eau sur le matériel bien plus forte (car sous pression en sortie de buse) dans toutes les directions pendant un temps qui peut être relativement bref en regard de l'épreuve de pluie.

Durant leur phase de vie, les matériels sont susceptibles d'être exposés à diverses sollicitations qui peuvent être directement ou indirectement simulées par un essai de type « jet d'eau ».

Durant leur vie, les matériels peuvent être directement soumis à un jet d'eau dans le cadre d'opération de nettoyage (par exemple opération de nettoyage classique au jet, suppression de trace de boue pour les systèmes terrestres, suppression des dépôts salin pour les systèmes naval, décontamination chimique pour les systèmes air, naval et terrestre, etc.). On rappelle que ce chapitre ne traite pas du nettoyage à l'éponge qui peut être rencontré lors des opérations de nettoyage. Toutefois les effets liés à l'infiltration d'eau dû à un lavage à l'éponge sont considérés couverts par un essai de type « jet d'eau ».

De manière indirecte les matériels peuvent être soumis, dans le cadre de leur qualification, à une épreuve de type « jet d'eau » pour simuler les effets d'une averse de pluie rencontrée à grande vitesse. Par exemple, ce cas peut se rencontrer pour les systèmes terrestres en mouvement rapide, les systèmes emportés sous avion ou les missiles en vol libre qui traversent un nuage saturé en humidité ou une averse de pluie. Dans ce cas, les essais de pluie classiques ne sont pas adaptés car ils ne sont pas suffisamment sévères en regard de la vitesse d'impact des gouttes d'eau sur le matériel. L'alternative pour simuler les effets d'une averse de pluie rencontrée en mouvement consiste à spécifier un essai de type « jet d'eau ». L'essai de type « jet d'eau » permet en effet une projection d'eau bien plus forte (car sous pression). Cette analogie est d'autant plus valable que la vitesse d'impact des gouttes d'eau sur le matériel est importante.

L'objectif de l'essai de jet d'eau spécifié est de vérifier le comportement et/ou l'étanchéité du matériel pendant et après l'exposition à un jet d'eau.

On notera que les opérations de nettoyage peuvent être réalisées sur un matériel hors fonctionnement sauf stipulation contraire dans les conditions d'utilisation. Par ailleurs, on notera aussi que, lors des opérations de transport terrestre, d'emport sous avion ou de vol libre, les matériels peuvent être soumis à une averse de pluie lorsqu'ils sont en mouvement alors qu'ils sont hors ou en fonctionnement. Aussi, il sera nécessaire d'examiner la configuration fonctionnelle mais aussi physique du matériel lorsqu'il est soumis à une opération de nettoyage au jet d'eau mais aussi lorsqu'il est susceptible de traverser une averse lorsqu'il est en mouvement (en roulage terrestre ou en vol), de sorte à le tester dans l'état le plus représentatif des conditions d'utilisation réelles. Sauf stipulation contraire dans le programme d'essai, tous les câblages électriques, liaisons mécaniques et autres interfaces mécaniques et fonctionnelles doivent être reliés au matériel lors de l'essai dès

lors qu'ils le sont durant la vie réelle. Par exemple, les connecteurs qui sont laissés libres durant les opérations de nettoyage ou d'emport sous avion dans la vie opérationnelle du matériel doivent le rester durant l'essai de type « jet d'eau ».

Les sévérités d'essai caractérisant la sollicitation de type jet d'eau doivent, au mieux, découler d'un processus de personnalisation. Cependant certaines sévérités forfaitaires sont proposées dans le tableau 8.

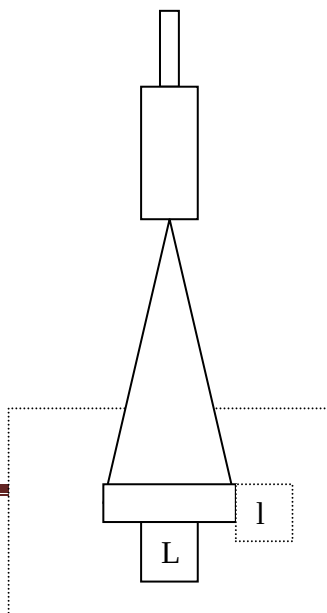
	<i>Pression en sortie de buse</i>	<i>Distance sortie de buse / matériel</i>	<i>Durée d'exposition au jet</i>
Sévérité 1	<i>Buse de diamètre 12.5mm alimentée en eau courante sous une pression relative de 10^5 Pa (1bar)</i>	$1,5\text{ m }^{+0,5}_{-0}$	5min
Sévérité 2		$3\text{ m }^{+0,5}_{-0}$	15min

Tableau 8 : Sévérités d'essai de pluie forfaitaires

1.12.2 Remarques sur le mode opératoire d'essai:

- le matériel sera stabilisé à une température spécifiée dans le programme d'essai, représentative des conditions d'utilisation réelles. On note que seules les conditions de température chaude pourront être retenues de sorte à simuler les cas d'exposition les plus défavorables en regard des effets d'infiltration possibles liés à un jet d'eau haute pression.
- le matériel sera soumis au jet dans toutes les directions spécifiées dans le programme d'essais, autorisée par les conditions d'utilisations réelles. Forfaitairement toutes les directions possibles du matériel seront passées en essai.
- une vérification fonctionnelle du matériel sera effectuée après essai sans aucune opération de séchage ni d'essuyage.
- en vue d'une expertise, une fois l'exposition au jet d'eau terminée, le matériel sera épongé et essuyé avant son expertise de sorte à ne pas introduire d'eau lors de son ouverture.

1.12.3 Cas du lavage haute pression



Les lavages normaux ou de décontamination se font parfois avec des systèmes à haute pression.

Une idée de la pression d'impact sur le matériel est nécessaire pour éviter des dégradations.

En premier lieu ne pas confondre pression de pompe et pression d'impact.

D'une façon très simpliste, mais qui assure une bonne idée de l'ordre de grandeur, la pression d'impact peut être calculée par la formule suivante

$$P = F/S$$

Si $P = 10$ kg pression exercée sur le spécimen

$S = L \times l \times 0.2 \times 0.01$ surface en cm^2 arrosée par le jet

Pression impact = $P/S \ 10/0.002 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

La formule détaillée et complète tient compte de la vitesse, de la qualité du fluide (ρ), du frottement du jet dans l'air entre la sortie de la buse et le produit, ces éléments sur le terrain ne sont pas forcément connus.

Cette pression d'impact pour un même débit dépend de la pression de l'eau fournie par la pompe, de l'angle du Jet et de la distance buse-objet.

Ainsi pour un débit de 750 l/h un angle de buse de 25° on obtient les valeurs du tableau 9

Pression pompe en bar	Croissance de la pression d'impact	Pression impact en bar
40	100%	0.35
80	134%	0.47
120	149%	0.52

Tableau 9 : Valeurs de pression d'impact

Le fait de tripler la pression de pompe n'augmente que de 50% la pression d'impact.

Les valeurs optimum de pression d'impact pour un lavage sont de 0.6 à 1 bar.

Le choix du type de jet est le suivant

- Salissures tenaces : angle de 0 à 25°
- Salissures moyennes : angle de 25° à 50°
- Salissures légères : angle de 50 à 80°

La distance entre la buse et l'objet est compris entre 10 et 30 cm.

Au sein de l'armée de terre, les servants des postes de décontamination ont des procédures pour le choix des buses. Par exemple :

- Décrochage des trains de roulement ou l'action mécanique est primordiale pour enlever la boue: buse 0°
- Nettoyage des antennes radio, capote de véhicule jet dit: queue de carpe : env 30°

Le lavage haute pression est tout à fait possible sur des parois sensibles en prenant des précautions élémentaires.

1.13 Immersion

1.13.1 Définition

L'immersion peut être rencontrée dans des situations très variées (la liste suivante n'est pas exhaustive):

- cas d'un matériel à poste à profondeur fixe sous l'eau,
- cas d'un matériel installé sur la surface externe de la coque d'une superstructure soumis à des cycles d'immersion en eau de mer et d'exposition aux atmosphères salines,
- cas d'un matériel installé sur le pont des navires soumis au mouillage momentané. Les observations subjectives indiquent que le matériel peut être soumis aux périodes courtes de précipitation équivalentes à la forte pluie et aux accumulations d'eau jusqu'à 150 millimètres de hauteur. Aucune donnée mesurée indiquant les valeurs des formes induites de mouillage n'est disponible,
- cas d'un matériel installé dans les compartiments à air conditionné soumis à une précipitation liée à la condensation et au ruissellement intervenu sur les surfaces en surplomb,
- matériel installé ou entreposé en compartiments non conditionnés (par exemple, comme compartiments de cargaison, cintres d'avions, garages pour véhicules porteur, salles de moteur et de générateur, ateliers, blanchisseries et offices) : il y a une plus grande probabilité que le matériel soit soumis à une certaine forme de mouillage comprenant, dans certains cas, la possibilité d'immersion partielle. Sévérités de jusqu'à 280 l/m²/hr devrait être supposé pour la précipitation, l'égoutture, et mise en commun, et les profondeurs jusqu'à de 150mm pour l'immersion,
- conséquences de situations d'urgences imprévisibles résultant de défaillances telles que des joints rompus et disjoints dans des conduites d'eau. Habituellement, un taux minimal de 280 l/m²/h est considéré. (cas d'égouttage et d'inondation accidentelle),
- matériel stocké dans des bâtiments permanents ou semi-permanents soumis à du ruissellement provenant de surfaces supérieures ou d'une condensation sur des tuyaux d'eau, particulièrement en climat tropical humide,
- matériel subissant des sprays provenant de tuyaux d'eau percés ou de sprinklers d'incendie,
- matériel soumis au mouillage (provenant de la chute de gouttes d'eau) en raison de surfaces enveloppes froides rencontrant l'air moite chaud, par exemple dans le cas de matériels transportés sur véhicules climatisés dans des régions tempérées et tropicales,
- matériel restant installé in-situ et soumis au mouillage quand des nettoyeurs haute pression ou des lances à eau sont utilisés pour le nettoyage et le dégivrage du véhicule,

- quand des véhicules doivent être adaptés à l'eau, le matériel monté extérieurement est exposé à être soumis à une immersion partielle ou totale, dépendant de la profondeur de l'eau et de l'endroit d'installation (hauteur au-dessus du sol) sur le véhicule. Une certaine hauteur d'immersion peut affecter le matériel interne en fonction de l'efficacité de l'herméticité des portes et des trappes. Les circonstances sont infiniment variables et les conditions telles que les profondeurs et les durées d'immersion et les niveaux prévus de survie ou d'opération devraient être définies dans des documents de conditions d'environnement ou opérationnelles,

1.13.2 Les effets

Les effets de cette immersion sont également très variés :

- le matériel subissant une immersion sera soumis à une pression hydrostatique fonction de la profondeur d'immersion définie dans la spécification du matériel. La pression est liée à la profondeur de l'immersion par la relation : $p = 9,8 d$
- p est la pression hydrostatique en kPa, et d est la profondeur de l'immersion en mètres.
- pour les sprinklers par exemple les intensités de précipitation peuvent être estimées : une intensité maximale de 280 l/m²/h est souvent considérée comme prévisible sur des durées de l'ordre de 15 mn pour de tels événements,
- les cycles d'immersion en eau de mer et d'exposition aux atmosphères salines favorisent le développement de la corrosion des matériaux métalliques et non métalliques. Tandis que sur la surface, les atmosphères salines peuvent être aspirées dans les compartiments ventilés avec un air frais ou être inspiré par le matériel partiellement scellé situé au-dessus de la ligne de flottaison, en raison des différences de pression provoquées par la variation de température induites,
- le taux d'humidité à l'intérieur des sections et des compartiments des mines et des torpilles lancées depuis des bâtiments de surface peut changer dès l'immersion à cause d'une modification globale dans la température du système à l'instant où il passe de l'air à l'eau. Des parties du système contenant des composants particulièrement sensibles à l'humidité doivent alors être remplis de gaz sec pour éviter la condensation,
- pour les câbles immergés, il faut utiliser des câbles souples conçus pour l'immersion ou la submersion dans les types de liquide prévus (eau douce, eaux usées, eaux chargées, eaux salées, eaux chlorées, liquides et aliments)
- des étiquettes spéciales permettent de témoigner que le matériel a été immergé même momentanément : l'encre utilisée est spécifique et se disperse au contact de l'eau. Cette encre a été appliquée sur un papier permettant de rendre visible le témoin. Ce témoin permet de révéler une immersion dans l'eau même de courte durée afin d'assurer par exemple la validité d'une garantie,
- la norme ISO 5635 /1978 caractérise le Mesurage des variations dimensionnelles du papier après immersion dans l'eau
- On nomme Biofouling l'incrustation sur une matière solide immergée dans un milieu aquatique d'êtres vivants (Bactéries, protistes, végétaux et animaux) aquatiques. Ce phénomène se trouve essentiellement dans un milieu marin, où le zooplancton est relativement divers et abondant, mais se retrouve, bien qu'en moindres proportions, en milieu dulcicole (milieu d'eau douce qui, à l'inverse de l'eau dure ou de l'eau de mer, contient peu de sels dissous). Le Biofouling peut être constitué, sur une même zone, de centaines d'espèces différentes d'êtres vivants. Une partie du plancton, constitué de larves d'invertébrés (sporifères, cnidaires, bivalves, brachiopodes, tuniciers, prochordés, vers tubicoles...etc), de végétaux et de bactéries finira par devenir sessile, c'est-à-dire ancrée sur

le substrat (fond de sable, vase, roche) ou sur un support convenable (autre animal ou autre végétal, sessile ou non, mort ou vivant, récif artificiel dû à des constructions humaines...etc) ; il concerne les matériels immergés sur de longues périodes.

1.13.3 Degrés de protection à l'eau d'une enveloppe

Le tableau 10 décrit les différents degrés de protection des enveloppes par un chiffre caractéristique (le deuxième chiffre significatif du code) tel que définie dans la norme CEI 529 (Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP)).

Chiffre caractéristique	Degré de protection	
	Description abrégée	Définition
0	Non protégé	Pas de protection particulière
1	Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau	Les gouttes d'eau (tombant verticalement) ne doivent pas avoir d'effets nuisibles
2	Protégé contre les chutes d'eau pour une inclinaison maximale de 15°	Les chutes verticales de gouttes d'eau ne doivent pas avoir d'effets nuisibles quand l'enveloppe est inclinée jusqu'à 15° de sa position normale
3	Protégé contre l'eau en <i>pluie</i>	De l'eau tombant en pluie dans une direction faisant avec la verticale un angle inférieur ou égal à 60° ne doit pas avoir d'effets nuisibles
4	Protégé contre les projections d'eau	De l'eau projetée de toutes les directions sur l'enveloppe en doivent pas avoir d'effets nuisibles
5	Protégé contre les jets d'eau	De l'eau projetée à l'aide d'une lance de toutes les directions sur l'enveloppe ne doit pas avoir d'effets nuisibles
6	Protégé contre les paquets de mer	Par grosse mer ou sous l'effet de jets puissants, l'eau ne doit pas pénétrer dans l'enveloppe en quantité nuisible
7	Protégé contre les effets de l'immersion	La pénétration d'eau en quantité nuisible à l'intérieur de l'enveloppe immergée dans l'eau, sous une pression et pendant une durée déterminée, ne doit pas être possible
8	Protégé contre l'immersion prolongée	Le matériel convient pour l'immersion prolongée dans l'eau dans des conditions spécifiées par le constructeur. Nota : cela signifie normalement que le matériel est rigoureusement étanche mais pour certains types de matériel, cela peut signifier que de l'eau peut pénétrer pourvu qu'il n'en résulte pas d'effets nuisibles.

Tableau 10 : Définition des degrés de protection

Nota : les descriptions abrégées figurant à la colonne 2 ne doivent pas être employées pour *spécifier* le mode de protection : elles en peuvent servir que de désignations abrégées.

1.13.4 Principaux facteurs de la corrosion par l'eau de mer

1.13.4.1 Salinité

L'eau de mer est un milieu complexe du point de vue chimique et biologique, son *PH* est relativement uniforme ($\sim 8,2$). Ses constituants ont en général un effet néfaste sur la résistance à la corrosion des métaux et en font un milieu particulièrement agressif.

Elle se caractérise par une forte salinité, d'où une conductivité élevée, ce qui favorise les couples galvaniques ainsi que les attaques localisées car la résistance de l'électrolyte ne joue plus qu'un rôle mineur dans le contrôle des courants de corrosion.

Par ailleurs les chlorures comme les autres halogénures présents dans l'eau de mer ont pour effet de provoquer la rupture des films d'oxydes responsables de la passivité et de la bonne tenue à la corrosion de nombreux alliages. C'est la première étape de la corrosion par effet de crevasse ou par piqûres. Ce sont donc des ions très actifs pour ces types de corrosion. De plus, les chlorures forment des produits de corrosion acides, acidité qui empêche souvent la restauration des films passifs. En ce qui concerne la corrosion généralisée, les vitesses de corrosion augmentent en général avec la teneur en sels.

1.13.4.2 Oxygène

L'oxygène est le facteur important de la corrosion.

En eau de mer, la réaction cathodique est le plus souvent la réduction de l'oxygène dissous donnant des ions OH^- . L'augmentation de la concentration en oxygène favorise cette réaction et peut conduire à une augmentation de la corrosion par dépolarisation cathodique. De plus, les variations de la concentration en oxygène à la surface d'un même matériau (variations dues à des gradients de vitesse, à la présence de crevasses ou de dépôts...) sont à l'origine de la corrosion par aération différentielle : les surfaces ayant la concentration en oxygène la plus faible subissent une corrosion accélérée en devenant anodes, alors que la réduction de l'oxygène a lieu sur les surfaces où la concentration est la plus forte. Si l'oxygène favorise la formation des films passifs des matériaux passivables, comme les aciers inoxydables ou les alliages d'aluminium, par contre la présence de chlorures rend ces films imparfaits. Il en résulte une augmentation des risques de corrosion par piqûres avec la teneur en oxygène.

La désaération de l'eau de mer est donc un moyen souvent utilisé pour diminuer la corrosion des circuits.

1.13.4.3 Les bactéries

Les essais de corrosion menés en eau de mer synthétique sont en général moins sévères que ceux utilisant l'eau de mer naturelle. Cette différence est attribuée aux micro-organismes présents dans l'eau de mer qui modifient localement les conditions corrosives par la formation d'un biofilm.

Les bactéries sulfato-réductrices sont citées à titre d'exemple ; elles se développent en milieu anaérobie et se trouvent sous des dépôts ou des produits de corrosion.

1.14 Neige

1.14.1 Définitions

Les précipitations (pluie ou neige) résultent de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, en atmosphère saturée (masse nuageuses). Aux températures négatives, les fines gouttelettes d'eau ainsi formées se trouvent en état de surfusion. En présence de noyaux de congélation (fines poussières par exemple), certaines de ces gouttelettes d'eau surfondues se transforment en cristaux de glace, qui vont servir de germes aux cristaux de neige. Cette congélation s'effectue à des températures variables, approximativement entre $-5^{\circ}C$ et $-25^{\circ}C$; en l'absence de noyaux, elle a lieu vers $-40^{\circ}C$.

Un cristal de neige va croître autour du petit noyau de glace initial. Selon les conditions de température et de pression de vapeur d'eau, le cristal de neige prend des formes différentes (types

"étoile" ou "colonne"). En tombant vers le sol, ce cristal peut encore se transformer. Il peut capter d'autres gouttelettes d'eau surfondue, être brisé par le vent si il est suffisamment fort, ou fondre partiellement en traversant des couches atmosphériques à température positive.

La neige observée au sol peut donc prendre des formes variées et avoir des caractéristiques physiques (masse volumique, cohésion, etc.) très différentes, selon les conditions rencontrées. Une classification de la neige fraîche distingue *jusqu'à 80 types de cristaux*. La classification plus simple, adoptée par ***l'Organisation Mondiale de la Météorologie***, compte dix formes typiques, depuis les cristaux hexagonaux ou étoilés jusqu'aux grains de glace constituant la grêle.

On peut résumer en cinq catégories les principaux types de cristaux de neige existant dans la nature en associant les dimensions de particules et la masse volumique de la neige fraîche déposée (tableau 11).

Désignation	Forme et taille	Masse volumique (kg/m ³)											
		Pkg/m ³	<50	50 100	100 150	150 200	200 250	250 300	300 350	350 400	400 450	450 500	>500
neige fraîche	cristaux intacts (étoiles, plaquette) de 0.1 à qq mm	+	%	50									
particules reconnaissables	fragments de cristaux de 0.1 à qq mm	Λ	%	50									
grains fins	petits grains isolés de 0.1 à qq mm	•	%	50									
givre de profondeur	gros cristaux sans cohésion (colonnes, aiguilles) de 0.3 à qq mm	Λ	%	50									
grains ronds	forme arrondie agglomérat de grains de 0.5 à qq mm	o	%	50									

Tableau 11 : Catégories des principaux types de cristaux

La masse volumique de la neige varie principalement suivant le type de neige, la température et le vent. Dans les zones climatiques pour lesquelles le risque d'observer deux fortes chutes de neige dans un délai inférieure à quelques jours est faible, la *valeur moyenne de 150kg/m³* correspond à une neige jeune et à un tassement modéré. C'est la valeur que l'on retient généralement en France pour convertir les épaisseurs de neige mesurées dans les stations météorologiques de plaine, aux charges correspondantes.

Pour d'autres zones climatiques, compte tenu du tassement résultant de plusieurs événements de chute de neige, la masse volumique à considérer pourra varier de *100 kg/m³ à 700 kg/m³*. Cette disparité rend la prise en compte de valeurs généralisées de masse volumique et de charges de neige délicate.

1.14.2 Interactions de la neige avec les structures

La neige est une action climatique, à considérer dans le dimensionnement des structures et de leurs éléments. Principalement, il s'agit de la charge de neige en toiture des constructions ou sur les structures; plus précisément des charges de neige agissant sur les différentes parties d'une structure. Ces charges interviennent dans les vérifications de stabilité et de résistance des structures: les concepteurs de systèmes soumis aux charges de neige s'intéressent donc à des événements météorologiques de faible probabilité d'occurrence et de forte intensité.

L'altitude a une influence très marquée sur l'épaisseur de la couverture neigeuse. La diminution de la température de l'air en fonction de l'altitude a d'abord pour effet d'augmenter la proportion des précipitations sous forme de neige par rapport à celle sous forme de pluie. D'autre part, du fait de la persistance de température négative au sol, la couverture neigeuse résulte de plusieurs "*épisodes neigeux*", tout au long de la période hivernale. Ainsi, l'épaisseur maximale de neige sera atteinte entre février et mai, selon l'altitude, pour les régions situées dans l'hémisphère nord. Enfin les précipitations augmentent, en quantité, avec l'altitude.

A titre d'illustration du paramètre climatique, précisons que la charge de neige, résultant d'un événement de chute de neige de *probabilité 0,02 (événement cinquantenal)*, à prendre en compte en France continentale pour le dimensionnement des constructions varie de $0,45 \text{ kN/m}^2$ à $0,90 \text{ kN/m}^2$ suivant les régions concernées pour des altitudes inférieures à 200 m (pour des altitudes supérieures, des majorations de charges sont appliquées. Dans les pays du nord de l'Europe (*Norvège, Suède, Finlande*), les charges de neige cinquantenales sont au minimum de $1,2 \text{ kN/m}^2$ pour la zone Suède/Finlande et de $1,75 \text{ kN/m}^2$ pour la Norvège. La valeur maximum de 9 kN/m^2 de charge de neige ayant été identifiée en Norvège.

Si les charges de neige dépendent très clairement du climat et de l'altitude d'un site particulier, d'autres facteurs interviennent également.

L'éventualité d'une pluie postérieure à la chute de neige est à considérer, car elle peut augmenter fortement les charges de neige au sol et sur une structure. Ce phénomène peut conduire par exemple, quelle que soit la pente de la surface (*dans la gamme de 0 à 10 degrés*), à un alourdissement de l'ordre de $0,6 \text{ kN/m}^2$ après 2h de pluie de forte intensité. Une valeur plus forte encore pourra être atteinte dans le cas d'une pente nulle ou d'une surface déformable créant des contre-pentes sous l'effet de la charge de neige initiale. Pour information, cette surcharge accidentelle est de $0,9 \text{ kN/m}^2$ pour certaines régions françaises.

Le vent est un autre facteur influent. Si la vitesse du vent n'est pas négligeable, pendant la chute de neige, une partie des flocons entraînée par les écoulements d'air, se dépose sur les zones les moins ventilées ou dans le sillage des aspérités aérodynamiques conduisant des accumulations locales de neige importante, voire des déséquilibres de charges plus sollicitantes que des charges uniformément réparties.

Aux vitesses plus élevées (*à partir de 6m/s environ*), la neige déposée peut être transportée par le vent et redistribuée, d'une zone à une autre. Là encore, le phénomène induit des accumulations locales importantes de neige ou des déséquilibres de charges.

Pour l'évaluation des surcharges de neige, on cherche à définir l'influence climatique au moyen d'une charge de neige au sol de référence que l'on corrige ensuite pour tenir compte de la géométrie de la structure/construction, de la possibilité d'enlèvement ou d'accumulation de la neige sous l'effet du vent et de l'altitude du site considéré. Une approche probabiliste est adoptée pour définir la charge de neige au sol de référence, par une "*période de retour*" donnée. Une étude statistique des données météorologiques disponibles est donc nécessaire.

D'autres effets des concomitances vent et neige doivent être considérés, en particulier les accrétions de neige collantes sur les surfaces verticales. Le plus souvent observés en situation de température ambiante faiblement négative, ce phénomène peut provoquer des blocages de systèmes mécaniques et des chargements en porte-à-faux.

Le cas des vents de neige sèche, très pénétrante, peut également provoquer des sollicitations sévères des systèmes mécaniques et thermiques (*moteur, ventilateur, échangeurs,...*), par exemple, du point de vue des risques de colmatage des entrées d'air ou d'immobilisation des pièces mobiles.

Les situations de tempête de neige sont également susceptibles de provoquer des réductions importantes de la visibilité qui peuvent avoir un impact sur la sécurité, en particulier dans le domaine des transports.

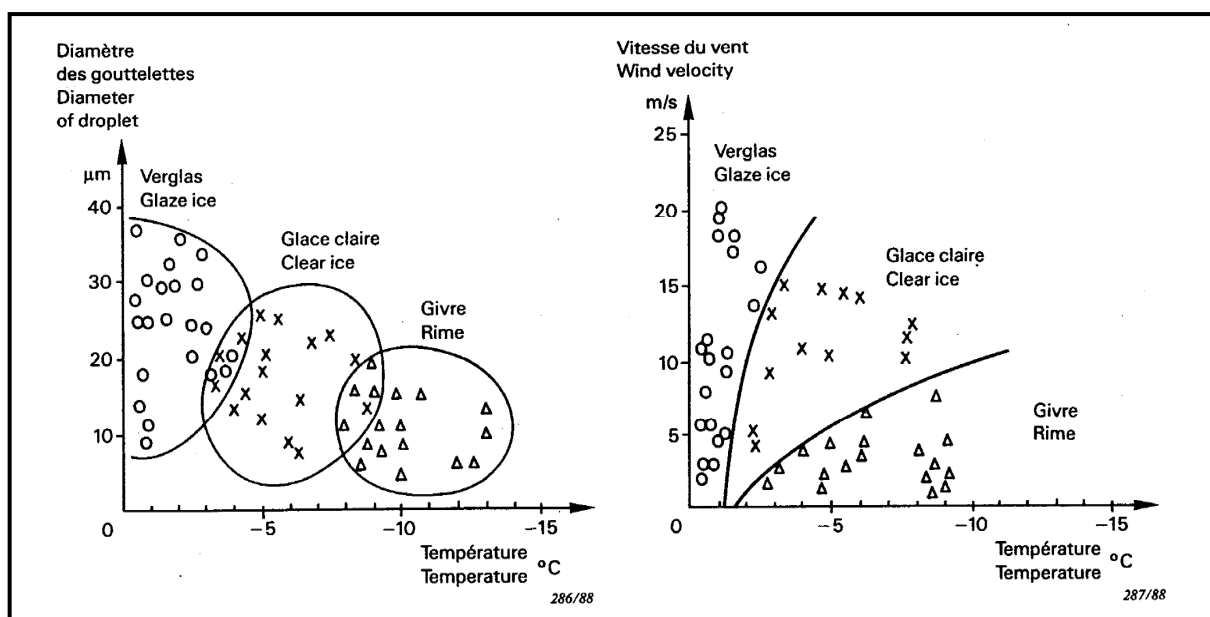
1.15 Glace (givre blanc ou pluie verglaçante)

La glace survient comme une combinaison de la pluie tombant sur une surface refroidie au dessous de 0°C (par exemple en raison du rayonnement vers le ciel nocturne par temps clair) ou par gouttes de pluie en surfusion gelant à l'impact. Des épaisseurs de glace *allant jusqu'à 75 mm* peuvent être relevées sur des mâts supports d'antenne et des structures élevées analogues.

On peut distinguer les quatre formes suivantes :

- **Gelée blanche**
La gelée blanche se forme quand un air humide est au contact d'une surface refroidie à une température inférieure à 0°C et se condense sur cette surface, en général quand la vitesse du vent est faible. Elle est constituée de cristaux en forme d'aiguilles, et son adhérence aux surfaces est faible. Sa densité est peu élevée ($0,1\text{g/cm}^3$ ou moins)
- **Givre**
Le givre se forme par collisions répétées et congélation de gouttelettes d'eau en surfusion (*diamètre 10 à 20 μm*), en suspension dans les nuages ou le brouillard, poussées par le vent contre un objet. La congélation a lieu à l'impact. L'aspect caractéristique est dit « en queue de crevettes » parce que les points où il adhère à l'objet sont petits et se développent dans la direction d'où vient le vent. Sa couleur est blanche et sa structure est granuleuse. La densité va de $0,3$ à $0,9\text{g/cm}^3$. Dans des zones montagneuses, le givre peut augmenter de *30 mm/h* sur un objet ou *de 30 cm pendant une nuit*. Le givre peut venir en même temps que la neige, ce qui entraîne alors une couche énorme de neige sur un objet qui s'y prête. Des couches maximales de *150 mm près du sol*, augmentant linéairement *jusqu'à 500 mm* ne sont pas à exclure. La charge de ces couches est d'environ 200kg/m^2 .
- **Glace claire**
La glace claire se forme lorsque des gouttes de pluie en surfusion se congèlent sur une surface. Elle est dure et opaque ou transparente. Elle peut former une structure constituée d'une succession de couches opaques et transparentes avec de petites bulles d'air incluses dans la structure. La glace claire n'a pas de forme particulière. Elle est compacte, sa masse volumique est grande et son adhérence est forte. La glace claire se forme lorsque la température est basse et la vitesse du vent élevée.
- **Verglas**
Le verglas se forme lorsque des gouttes de pluie en surfusion (*diamètre 0,5 mm et plus*) tombent sur une surface et qu'un film d'eau est formé avant congélation. Sa masse volumique et son adhérence sont élevées et il ne comporte pas de bulles d'air.

Selon la température de l'air, la vitesse du vent, le diamètre des gouttelettes d'eau en surfusion, la teneur en eau à l'état liquide, l'une ou l'autre des formes précédentes peut être rencontrée (voir figure 12).



Trois types de formation de glace en fonction de la température et du diamètre des gouttelettes

Trois types de formation de glace en fonction de la température et de la vitesse du vent

Figure 12 : Formes de glace selon CEI 60721-2-2

Si l'on considère une surface de forme cylindrique, il existe une valeur limite maximale du rayon de ce cylindre, telle que pour une vitesse du vent et un diamètre des gouttelettes d'eau donnée, peu ou très peu de glace se formera (voir figure 13).

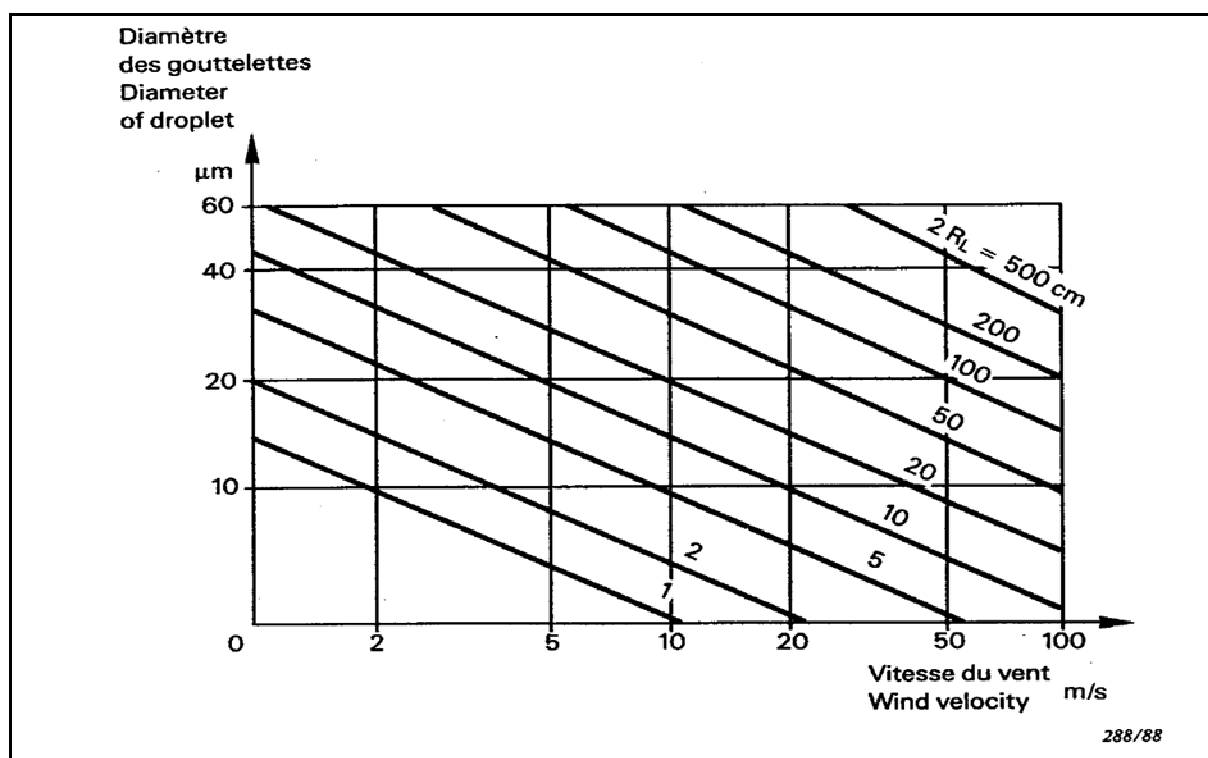


Figure 13 : Rayon limite d'un cylindre sur lequel peu ou très peu de glace se formera (Source : CEI 60721-2-2)

1.16 Brouillard

1.16.1 Définitions

Le brouillard est le phénomène météorologique constitué d'un amas de fines gouttelettes ou de fins cristaux de glace, accompagné de fines particules hygroscopiques saturées d'eau, souvent de taille microscopique, réduisant la visibilité en surface. Sa composition est donc identique à celle d'un nuage dont la base toucherait le sol. Par convention, les météorologistes parlent de brume lorsque la visibilité horizontale est supérieure à un kilomètre et de brouillard si la visibilité est inférieure à un kilomètre.

La plupart des brouillards rencontrés en haute mer sont des brouillards d'advection. Leur dissipation se produit avec le réchauffement de la surface froide ou par un changement de masse d'air, au passage d'un front par exemple.

1.17 Brouillard salin

1.17.1 Définitions

L'association "Brouillard + adjectif salin" ne possède pas de définition propre, Le terme brouillard salin est utilisé pour effectuer des essais vérifiant la tenue d'un matériel dans un milieu corrosif choisi conventionnellement. Il ne peut être considéré comme un essai de tenue en atmosphère marine ni à d'autres effets chimiques. Il ne doit être utilisé qu'à titre d'évaluation expérimentale à caractère technologique. Les non représentativités *concernent le PH* différent de celui de l'eau de mer (*le pH de l'eau de mer varie entre 7,5 et 8,4, pour une moyenne de l'ordre de 8,2*) et la composition de l'atmosphère est plus complexe notamment avec la présence des micro-organismes d'origine marine.

De ce fait il n'est pas possible de corréliser simplement les résultats d'essai avec la tenue du matériel en situation réelle.

L'essai en " Brouillard Salin " soumet un matériel à une exposition d'une solution de 5% de NaCl et une température de 35°C². La durée d'exposition est normalisée permettant ainsi la comparaison entre matériels.

Cet essai permet de vérifier et de comparer les différentes solutions qui ont été prises pour la protection du matériel vis-à-vis de la corrosion.

1.17.2 Effets

La corrosion entraîne des:

- risques de grippage et de perte de liaison mécanique (diminution des sections résistantes, augmentation du jeu, desserrage),
- favoriser l'apparition et la propagation de fissures,
- provoquer des défaillances d'isolement,
- Accélérer ou provoquer des actions électrochimiques (électrolyse ou effet de pôle),
- etc.

² La quasi-totalité des normes impose ces valeurs. Certaines normes métiers peuvent déroger.

La corrosion peut être définie comme la détérioration des matériaux par attaque chimique ou électrochimique.

Elle est due à l'apparition d'humidité et aux réactions chimiques provenant de la présence de contaminants dans le matériau ou dans l'atmosphère.

Les phénomènes essentiels de corrosion des métaux sont toujours les mêmes.

Les effets corrosifs sont grandement influencés par les conditions climatiques.

1.17.2.1 Mécanismes de corrosion des métaux

On considère deux types de processus :

- les réactions sèches d'oxydation, d'écaillage et de ternissure,
- les réactions humides, qui nécessitent la présence d'un électrolyte liquide pour entretenir la réaction anode/cathode à la surface du métal.

1.17.2.2 Corrosion sèche

Dans l'air sec et pur aux températures normales, elle est limitée sur les métaux à la formation d'une couche d'oxyde visible, qui est même parfois totalement imperméable et protège le métal.

Les formes les plus courantes de corrosion sèche accélérée sont le ternissement provoqué par les polluants atmosphériques et l'épaississement de la couche d'oxyde au-delà de +200°C qui provoque des écailles.

1.17.2.3 Corrosion humide

Toute corrosion importante à température normale exige de l'humidité, même si elle reste en couche invisible.

Il existe une humidité critique en dessous de laquelle la corrosion humide est négligeable ; ce seuil dépend de la nature des contaminants (poussières et produits chimiques) en présence.

Par nature, le mécanisme électrochimique de la corrosion est une réaction d'oxydation et de réduction, l'interface métal/eau avec pour conséquence un transport d'électrons à travers le métal et d'ions à travers le liquide. Cette réaction est provoquée par l'apparition de circuits électrolytiques à la surface du métal, la force motrice étant la différence de potentiel entre les zones cathodes et anodes.

La présence d'oxygène dissous est presque toujours indispensable à la continuation de la corrosion d'un métal si l'apport d'oxygène est limité, la couche isolante d'hydrogène produite dans les zones cathodiques freine la corrosion.

L'aluminium et l'acier inox en sont des exceptions, l'apport d'oxygène y est bénéfique car il entretient la couche d'oxyde imperméable.

L'oxygène dissous peut provenir de l'atmosphère, l'absorption étant inversement proportionnelle à la concentration de l'électrolyte. Une forte concentration d'oxygène favorise la corrosion ainsi que le sel ou l'alcali.

Il n'y a pas de relation directe entre le pH et le taux de corrosion, la nature de l'acide polluant et du métal étant généralement les plus significatifs.

L'agitation de l'électrolyte (vent) est un facteur accélérant.

La présence de polluants (NaCl, SO₂) accroît la corrosion par augmentation de la conductivité de l'électrolyte.

La présence d'une couche de protection arrête la progression de la corrosion mais les discontinuités dans la couche dues aux fissures ou aux fixations (rondelles, écrous) engendrent une corrosion localisée entraînant des piqûres.

1.17.2.4 Corrosion bimétallique

Quand deux métaux différents sont reliés par un électrolyte, l'anode ou le métal de base subit une corrosion plus importante que s'il était seul.

Quoique la différence de potentiel entre les deux métaux soit la force motrice de la réaction, sa valeur n'a pas de relation directe avec l'intensité de la corrosion.

1.17.2.5 Effet des vapeurs organiques

Les métaux peuvent être corrodés par les vapeurs organiques de bois, colle, vernis, résine, conservateur, etc. Ceci n'a lieu que si la concentration de vapeur est suffisante, c'est-à-dire dans des espaces confinés et à des températures tropicales.

Les métaux les plus susceptibles à ce genre de corrosion sont le cadmium, l'étain, le magnésium et le zinc.

1.17.3 Méthode de calcul de la densité de la solution saline

Solution à 5% de NaCl

Calcul à partir de l'analyse pondérale :

Constituant	Fraction en masse	:	Masse moléculaire	=	Mol./g
NaCl	0.05	:	58.4428	=	0.0008555374 0.0527328377
H ₂ O	1.00	:	-	=	0.0535883751

$$\text{Masse moléculaire apparente : } \frac{1}{0.0535883751} = 18.66076362g$$

La densité de l'eau étant égale à 1 à la température de + 3.98°C, la densité de la solution saline à la même température sera de :

$$\frac{18.66076362}{18.01534} = 1.03582636$$

La variation de densité de la solution à 5% de NaCl en fonction de la température, varie comme celle de l'eau.

Les tables de la densité de l'eau en fonction de la température, figurant dans le **handbook Physic and Chemistry** donnent :

Température En degrés Celsius	Densité de l'eau
0	0.999841
3.98	1
5	0.999965
10	0.999700
15	0.999099
20	0.998203
25	0.996783
30	0.995944
35	0.994000

40	0.992211
60	0.983206
80	0.971786

Tableau 12 : Densité de l'eau en fonction de la température

La variation de densité de la solution à 5% de NaCl en fonction de la température est égale à la densité à +3.98°C multipliée par la densité de l'eau à la température considérée, soit :

Température en degrés Celsius	Densité de la solution à +3.98°C	Densité de l'eau	Densité de la solution saline
0	1.035826336	0.999841	1.03566164
3.98		1	1.035826336
5		0.999965	1.035790082
10		0.999700	1.035515588
15		0.999099	1.034893050
20		0.998203	1.033964956
25		0.996783	1.032493111
30		0.995944	1.031625024
35		0.994000	1.029611378
40		0.992211	1.02775828
60		0.983206	1.018430669
80		0.971786	1.006601532

Tableau 13 : Densité de la solution saline en fonction de la température

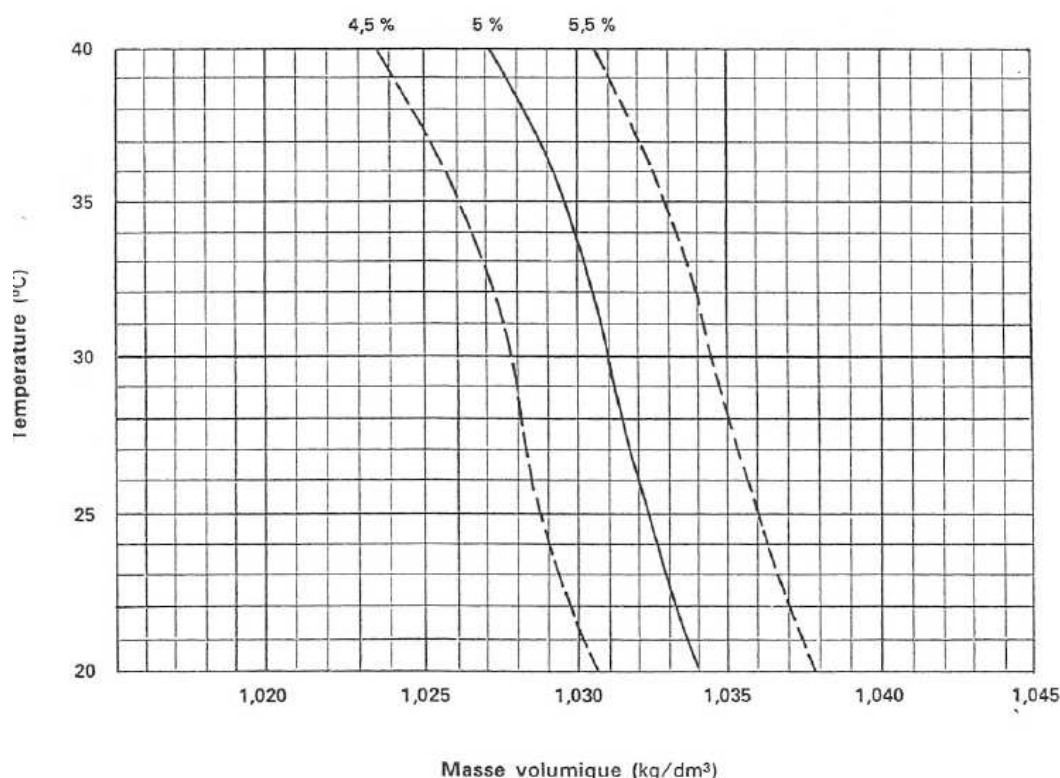


Figure 14 : Masse volumique en fonction de la température et pour trois concentrations

1.18 Gaz polluants acides

Des phénomènes naturels (tels que par exemple la décomposition de matériel organique générant des gaz sulfurés), ou issus de processus technologiques (par exemple la combustion de matériaux fossiles), sont à l'origine de la pollution de l'air par des composés gazeux autres que l'azote et l'oxygène constitutifs de l'atmosphère terrestre.

Ces contaminants sont capables de provoquer ou accélérer la dégradation de matériaux via des processus purement chimiques ou électrochimiques, le plus souvent par interaction avec l'humidité condensée sur les surfaces. C'est en effet la forme ionique solvatée des gaz (par exemple ions chlorures issus de la dissolution d'acide chlorhydrique) qui va jouer un rôle prépondérant dans le vieillissement par oxydation des métaux en voie humide, et ce à travers essentiellement deux mécanismes :

- une augmentation de la conductivité des films d'eau condensée en surface des matériaux,
- un effet complexant sur la plupart des ions métalliques.
- la corrosion sèche (en l'absence de tout film d'eau condensée) par des gaz oxydants (oxydes d'azote, de soufre, vapeur d'eau,...) ne devient significative qu'à des températures très élevées de l'ordre de plusieurs centaines de degrés. Aux températures usuelles, elle se limite le plus souvent à la formation d'un film d'oxyde très fin en surface, phénomène très mineur comparativement aux dégradations engendrées en présence d'humidité.

Le tableau 14 fournit quelques éléments sur les processus à l'origine des principaux composés gazeux rencontrés dans l'atmosphère terrestre à l'extérieur des locaux, ainsi que les niveaux de concentration connus.

Dans le cas des atmosphères constitutives de l'intérieur de locaux (bâtiments, véhicules, enceintes de stockage,...), des contaminants plus spécifiques peuvent être rencontrés, liés au dégazage par les

matériaux présents dans le volume clos. Il est clair que plus le confinement est important, plus cette éventualité de contamination est à prendre en compte. Le *tableau 15* répertorie les sources potentielles de quelques composés gazeux.

Les principaux facteurs à prendre en compte pour appréhender les effets d'une contamination de l'atmosphère par des composés gazeux potentiellement agressifs sont d'abord la température et l'humidité qui conditionnent l'apparition et la vitesse des phénomènes d'oxydation des métaux en voie humide.

Par ailleurs, il conviendra de bien connaître la topographie du site d'exposition par rapport à la source de polluant (par exemple : la présence d'étendues d'eaux superficielles dans la zone d'exposition située près d'une usine chimique va favoriser l'apparition de brouillards acides ; la présence de montagnes peut ralentir la dispersion de la pollution ;...), ainsi que d'autres caractéristiques climatiques telles que les conditions de vent (pour l'aspect dispersion et dilution de la pollution en particulier), de pluie (pour l'aspect lessivage des surfaces par exemple) et de variations journalières et saisonnières de l'ensemble de ces critères.

Sources de pollution		Polluants gazeux		
Technologiques	Naturelles	Nature	Domaine de concentration en 10⁻⁹ vol/vol	
			Zones d'émission	Zones non polluées
<i>Combustion de matériel organique</i>	<i>biosynthèse origine biologique, feux de forêts, éruptions volcaniques</i>	<i>CO₂</i>	<i>331 000 à 700 000</i>	<i>329 000 à 331 000</i>
		<i>CO</i>	<i>100 à 70 000</i>	<i>/</i>
	<i>fermentations anaérobies</i>	<i>hydrocarbures légers autres que CH₄ (acycliques saturés ou non et aromatiques)</i>	<i>100 à 1000</i>	<i>10</i>
	<i>processus biologiques, orages</i>	<i>NO</i>	<i>5 à 50</i>	<i>1 à 4</i>
	<i>réactions photochimiques</i>	<i>NO₂</i>	<i>5 à 70</i>	<i>1 à 3</i>
	<i>Ensilage, combustion matériaux plastiques</i>	<i>HCHO</i>	<i>1 à 100</i>	<i>/</i>
<i>Combustion des combustibles fossiles (charbon, fuel)</i>	<i>/</i>	<i>SO₂</i>	<i>10 à 100</i>	<i>0,1</i>
	<i>réactions photochimiques</i>	<i>SO₃</i>	<i>1 à 25</i>	<i>/</i>
	<i>éruptions volcaniques</i>	<i>H₂S</i>	<i>0,1 à 70</i>	<i>/</i>
	<i>fermentations anaérobies</i>			
<i>Industrie chimique</i>	<i>réactions photochimiques</i>	<i>Cl₂</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
	<i>actions bactériennes dans le sol</i>	<i>NH₃</i>	<i>10 à 50</i>	<i>1 à 4</i>
<i>Décharges électriques</i>	<i>orages</i>	<i>O₃</i>	<i>50 à 150</i>	<i>10 à 50</i>
	<i>réactions photochimiques</i>			
<i>Incinération des ordures</i>				
<i>Industrie chimique</i>	<i>/</i>	<i>HCl</i>	<i>5 à 10</i>	<i>/</i>

Tableau 14 : Domaine de concentration des principaux polluants gazeux de l'air

<i>Composés gazeux ou familles de composés</i>	<i>Sources potentielles dans des locaux</i>
<i>Acides organiques (formique, acétique,...)</i>	- Caisse en bois, en contreplaqué - Joints silicones
<i>Composés soufrés (H₂S en particulier)</i>	- Papiers et cartons, - Joints polysulfure, élastomères vulcanisés au soufre - Mousses de protection
<i>Phénol</i>	- <i>Phénoplastes (résines formo phénoliques)</i>
<i>Esters d'acides organiques</i>	- <i>Polymères plastifiés</i>
<i>Ammoniac (NH₃)</i>	- <i>Phénoplastes, aminoplastes</i>
<i>Amines</i>	- <i>Résines époxy</i>
<i>Acide chlorhydrique (HCl)</i>	- <i>PVC</i>

Tableau 15 : sources de contaminants gazeux à l'intérieur de locaux

2 LES EFFETS DES AGENTS D'ENVIRONNEMENT PAR SEGMENT DU PROFIL DE VIE

2.1 Opérations logistiques

2.1.1 Le transport

2.1.1.1 La température

2.1.1.1.1 Généralités

Les températures subies par le matériel, pendant le transport, peuvent affecter les propriétés physiques et chimiques des matériaux qui le composent. La dilatation et la contraction de structures accompagnées de la réduction de résistance mécanique et du changement de ductilité se traduisent par l'interférence ou la séparation des pièces adjacentes.

D'où des niveaux d'effort et de contrainte inadmissibles conduisant à des déformations permanentes ou à une défaillance mécanique.

Les variations des caractéristiques électriques et électroniques des composants ainsi que le changement de viscosité des lubrifiants réduisent la précision, la fiabilité et l'efficacité opérationnelle.

Le choc thermique, de son côté, induit des taux élevés de dilatation et de contraction, avec des efforts pouvant aller jusqu'à la rupture des matériaux, des joints collés, ou à des joints dégradés.

Effets possibles

La dégradation du matériel dépend de l'exposition aux températures élevées et basses. Elle est influencée par la durée d'exposition pour chaque phase de transport.

Par exemple : le nombre de cycles diurne ou la durée à une sévérité donnée pendant une phase où le matériel est vulnérable. Ce dommage dépend aussi du degré de protection du conditionnement.

Effets typiques des températures élevées :

- modifications des caractéristiques physiques des matériaux comme l'élasticité, la résistance à la rupture
- modifications des dimensions par la dilatation ou la compression, rupture des soudures en particulier pour la jonction entre parties métalliques et non métalliques comme, par exemple, les jonctions entre explosifs, carburant solide et leur réservoir et conteneur.
- déformations permanentes au niveau des joints voir norme : **DEF STAN 00-35 (part 6)/3 chapter 2-01 12**
- mélange de composant, cristallisation, *les effets précédents* peuvent apparaître conjointement.
- fonctionnement erratique ou hors plage des sécurités thermiques
- vieillissement accéléré provoquant des criques, fêlures, décomposition, perte de couleurs opacité des revêtements de surface.
- réactions chimiques pouvant générer des gaz toxiques accélérant les transformations et pouvant être dangereux pour la santé.
- réduction ou dégradation des performances pour les composants électriques et électroniques
- génération de décharges électrostatique particulièrement en cas de faible humidité
- modification des caractéristiques des systèmes isolants et amortisseurs qui peuvent être déterminant pendant la situation de transport.

Exemples d'effets dus aux basses températures :

- Contrainte statique pour les vitrages enchâssés

Plus de détails sur les effets dus aux températures élevées et basses sont répertoriés au :

Chapitre 2-02 of Part 4 de la norme DEF STAN 00-35

Exemples d'effets dus aux chocs thermiques et aux variations rapides de températures :

- Rapides et importants taux de dilatations et/ou de contraction des matériaux provoquant des contraintes pouvant générer des criques, fêlures et des déformations de structure.
- Différentiel de dilatation générant des fêlures au niveau des jointures des soudures, détériorant les couches de protection, modifiant la transparences des vitrages et provoquant des tensions internes dans les vitrage enchâssés.
- Fêlures dans les blocs de combustible ou d'explosif

Plus de détails sur ces effets sont données au :

Chapitre 2-02 of Part 4 de la norme DEF STAN 00 35.

2.1.1.1.2 Avions et missiles d'haute altitude

Les températures hautes et basses affectent les caractéristiques physiques et chimiques des ergols combustibles qui peuvent avoir comme conséquence un défaut de fonctionnement des moteurs des armes guidées.

2.1.1.2 Humidité

2.1.1.2.1 Généralités sur l'humidité

Les états humides induits par la chaleur, résultant d'une combinaison de ventilation insatisfaisante et d'absorption imposée d'humidité, accélèrent la dégradation des matériaux à l'intérieur des véhicules.

Les atmosphères chaudes et humides dans des secteurs non aérés fournissent des conditions idéales pour la progression de la corrosion, de l'attaque chimique et la croissance des champignons.

Les niveaux bas d'humidité pendant le transport peuvent influencer les caractéristiques de composants électriques et électroniques et affecter le calibrage, la stabilité et l'exactitude des systèmes électroniques une fois utilisés immédiatement après le transport.

2.1.1.2.2 Spécificité de l'humidité en transport

La chaleur humide est induite dans des compartiments, non conditionnés, situés à l'intérieur du porteur. Notamment dans les abris permanents individuels pour le matériel, ou sous les couvertures provisoires sur le pont principal des bâtiments navals. Cette chaleur humide est le résultat d'une ventilation inappropriée conduisant à une aspiration et à une captation de l'humidité.

Ce qui accélère la dégradation des matériaux et cause un accroissement des défauts de fonctionnement du matériel par rapport à une exposition aux seules conditions météorologiques locales.

La réduction de la résistance d'isolement des circuits et des composants peut générer des performances dégradées, des risques pour les matériels de sécurité, une fiabilité réduite, ou la défaillance totale de systèmes électriques et électroniques.

Les performances du matériel de surveillance peuvent être dégradées par l'humidité élevée et par des accumulations de vapeur d'eau ou d'eau dans les systèmes optiques. Les niveaux bas d'humidité peuvent influencer les caractéristiques de composants électriques et électroniques et affecter le calibrage, la stabilité et l'exactitude des systèmes électroniques.

Les atmosphères humides et chaudes dans des secteurs non aérés fournissent des conditions idéales pour la croissance fongique d'où une attaque, par des agents corrosifs, aggravée. Les points à considérer sont les effets de l'humidité sur le matériel, la réalisation et le maintien d'intérieurs secs, les procédés pour rendre un boîtier hermétique, les barrières à la pénétration de la vapeur d'eau, les procédures de séchage, et les méthodes de surveillance de l'humidité,

Les niveaux bas d'humidité peuvent réduire la teneur en eau des matériels employés pour la fabrication des composants électroniques et électriques et changer leurs caractéristiques.

Particulièrement en affectant leur stabilité qui est nécessaire pour le maintien des performances des systèmes dans les tolérances spécifiées.

L'efficacité opérationnelle des systèmes mécaniques dans des atmosphères sèches ou humides peut être réduite par la dégradation des lubrifiants.

Effets potentiels du à l'humidité

Les effets dus à l'exposition à l'humidité pendant le transport dépendent, du contenu de la journée de transport avec des périodes de stationnement et de la protection du conditionnement.

Bien que le matériel puisse revenir à des conditions naturelles d'humidité moins sévères, toutefois des dégradations peuvent survenir à cause de l'humidité induite qui provoque des dégradations permanentes telles que des moisissures et des champignons

Exemples d'effets induits par la chaleur humide :

- Gonflement et détérioration des matériaux non métalliques dus à l'absorption d'eau et réduction des propriétés mécaniques ainsi que des modifications dans les composants électriques et électroniques.
- Réduction de la résistance d'isolement.
- Corrosion du métal à cause du couple galvanique
- Création de micro environnement favorisant le développement des champignons et des attaques type corrosion chimique et bactériologique.
- Contamination par les fluides comme les lubrifiants.
- Plus d'informations sur ces effets de l'humidité sont donnés en **Référence 3 de l'Annexe A** de ce chapitre ainsi que le **chapitrer 4-02 of Part 4 d la DEF STAN 00 35**.

2.1.1.3 Pression atmosphérique

2.1.1.3.1 Pression atmosphérique en transport aérien

2.1.1.3.1.1 DIFFERENCES DE PRESSION

En vol, en altitude, la basse pression atmosphérique et ses variations pendant les changements d'altitude peuvent créer un différentiel de pression. Notamment à travers les parois des boîtiers et des dispositifs de protection du matériel et des composants.

Ainsi les composants peuvent se déformer, avoir des défaillances structurales ou interférer avec les pièces internes voisines, entraînant un mauvais fonctionnement.

Même lorsque le matériel est conçu pour égaliser les pressions, les vitesses de variation de pression pendant les évolutions en vol peuvent dépasser les valeurs admissibles. Les cas extrêmes peuvent intervenir pour des situations d'urgence dans des compartiments normalement pressurisés, ce qui peut entraîner l'explosion ou l'implosion de l'appareil.

2.1.1.3.1.2 REFROIDISSEMENT PAR CONVECTION

Le refroidissement par dissipation basé sur la convection naturelle pour maintenir une température de fonctionnement acceptable peut être retenu. Dans ce cas la basse pression atmosphérique en altitude peut dégrader les performances des matériels à cause de l'efficacité réduite du système de refroidissement.

2.1.1.3.2 Pression atmosphérique pendant le transport

Une pression atmosphérique supérieure à la pression standard ambiante peut poser des problèmes. Un matériel scellé ou partiellement scellé avec de bas taux de fuite peut se déformer provisoirement ou subir des dommages mécaniques permanents s'il est situé dans des compartiments utilisant la surpression pour obtenir une meilleure étanchéité vis à vis de l'air extérieur.

Les dispositifs de protection de matériels de grande dimension qui résistent à des variations normales de pression atmosphérique standard peuvent être concernés par cette préoccupation.

S'il est soumis à une pression hydrostatique, le matériel situé en enceinte close peut subir une déformation structurale. Ce qui altère l'intégrité des joints, donc permettant à l'eau d'entrer ou à des fluides et des gaz de s'échapper.

2.1.1.4 Glace

2.1.1.4.1 Généralités

L'accumulation de givre ou de glace provenant de la condensation de la vapeur d'eau déclenchée par des variations de température et de pression, peut avoir comme conséquence des performances dégradées ou la défaillance totale du matériel dans des secteurs particuliers ou dans des volumes sans conditionnement d'air.

Par exemple la fatigue imposée aux joints entre deux parties adjacente, les dommages provoqués par les opérations de dégivrage selon les procédures opérationnelles, la présence de moisissure après dégivrage.

D'où des risques potentiels de dégradation de la performance lors de la prochaine utilisation du matériel.

Pour des matériels de grande dimension, l'accumulation de glace, survenue lors de transport aérien peut provoquer une déstabilisation par modification de la répartition des masses. Ce qui modifie la position du centre de gravité et provoque des niveaux de vibrations inacceptables pour le porteur aérien, ainsi que pour les systèmes de liaison avec ce porteur.

2.1.1.4.2 Spécifique au transport maritime

Au cours des manœuvres du bâtiment naval, de la glace peut se former sur un matériel situé sur le pont principal. Cette glace sera semblable à celle présente dans les conditions normales. Les commandes, les mécanismes de déclenchement et les systèmes de mise en action des armements peuvent être détériorés ou complètement bloqués du fait des interférences causées par la carapace de glace. Le givrage et la formation de glace sur les sondes et les circuits optiques peuvent réduire les performances des systèmes de surveillance et de navigation.

2.1.1.5 Sable et poussière

Les effets de l'exposition à la poussière et aux atmosphères chargées de sable induisent :

- Des performances altérées pour les systèmes optiques par accumulations de substances particulières.
- La corrosion des matériaux sous-jacents exposés.
- Le colmatage des ouvertures.
- L'efficacité réduite des systèmes de refroidissement et de ventilation.
- Le dépôt à l'intérieur du matériel de couches de poussière pouvant causer le court-circuit des isolateurs, le cheminement et l'accumulation de l'électricité statique, l'interférence entre les pièces mobiles et la contamination des systèmes de lubrification.

2.1.1.6 Immersion, précipitation et jet

2.1.1.6.1 Généralités

Les effets de l'exposition aux précipitations et pulvérisations sont décrits dans :

la norme AECTP-230 (Edition 1 LEAFLET 2311/3)

2.1.1.6.2 Transport maritime

Les matériels, soumis à l'immersion, aux précipitations ou aux jets, sont susceptibles de subir des entrées d'eau par les ouvertures, les joints, et de l'infiltration. Ces entrées d'eau affectent les matériaux et les performances opérationnelles du matériel de la même manière que l'accumulation d'humidité par intrusion d'une atmosphère très humide.

2.1.2 Manutention et stockage

2.1.2.1 Température

2.1.2.1.1 Stockage

Les températures induites subies par le matériel pendant le stockage peuvent affecter les propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés dans leur fabrication. La dilatation et la contraction des composants structurels, accompagnées d'une diminution de la résistance mécanique et de changements de ductilité, peuvent avoir comme conséquence le contact ou la séparation avec les pièces adjacentes, l'application de niveaux de contrainte et de déformation inacceptables conduisant à des déformations ou à une défaillance mécanique.

Les variations induites dans les caractéristiques électriques et électroniques des composants et les changements de viscosité des lubrifiants réduisent la précision, la fiabilité et l'efficacité d'exploitation.

2.1.2.1.2 Manutention

Les températures transitoires induites subies par le matériel manipulé peuvent générer des niveaux de contrainte inacceptables dus à la différence de dilatation ou de contraction thermique entre les matériaux. Ce phénomène peut également entraîner une séparation de parties adjacentes.

2.1.2.2 Humidité

Des problèmes de stockage et de manutention se produisent dans des endroits à forte humidité. Les conditions de chaleur humide induites accélèrent la dégradation du matériel. Ces conditions se produisent dans des espaces ayant une ventilation inadéquate qui favorise la pénétration de l'humidité

Les atmosphères chaude et humide dans des espaces non ventilés offrent des conditions idéales pour le développement de la corrosion, les attaques chimiques et la croissance fongique. Les niveaux d'humidité induits faibles pendant le stockage peuvent influencer : les caractéristiques des composants électriques et électroniques et affecter la calibration, la stabilité et la précision des systèmes électroniques lorsqu'ils sont utilisés immédiatement après le stockage.

2.1.2.3 Gel

Les effets nuisibles potentiels du gel pour le matériel sont les contraintes imposées aux joints et aux interfaces des parties adjacentes ; les dommages subis résultant des méthodes utilisées pour dégivrer, et l'accumulation subséquente de moisissure après la fonte du gel.

2.1.2.4 Sable et poussière

Le matériel peut être affecté par la poussière et le sable pendant le stockage et la manutention. Les effets conduisent, mais ne se limitent pas nécessairement :

- à des performances altérées pour les systèmes optiques par accumulations de substances particulières,
- à de la corrosion des matériaux sous-jacents exposés,
- à du colmatage des ouvertures,
- à une efficacité réduite des systèmes de refroidissement et de ventilation,
- au dépôt à l'intérieur du matériel de couches de poussière pouvant causer le court-circuit des isolateurs, le cheminement et l'accumulation de l'électricité statique, l'interférence entre les pièces mobiles et la contamination des systèmes de lubrification.

2.1.2.5 Atmosphère saline

- Exemples des effets sur le matériel des atmosphères salines et des dépôts associés :
 - o Corrosion des métaux par action électrochimique.
 - o Boursoufflage des revêtements de protection par électrolyse.
 - o Formation des dépôts conducteurs causant le défaut de fonctionnement d'éléments électriques/électroniques des systèmes.
 - o Fendillement et fissuration extérieurs des plastiques et des caoutchoucs.

- o Perte de résistance à la traction, fragilisation et perte de propriétés électriques de matériaux non métallique.
- o Décoloration et perte de transparence.
- o Gravure à l'eau-forte chimique des objectifs et des transparents.
- Divers défauts peuvent résulter de l'interaction des processus de corrosion et des caractéristiques de conception des matériels, par exemple la proximité de métaux différents (corrosion bimétallique), l'action combinée de la corrosion et de forces mécaniques (fatigue-corrosion, contrainte et fretting-corrosion) et la fragilisation des aciers à haute limite élastique (fragilisation par l'hydrogène).
- Les mécanismes et les facteurs influençant le taux de corrosion du métal et la détérioration des substances non métalliques sont discutés plus en détail dans la **référence 2** de ce chapitre et dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-02**. L'avis de spécialistes devrait être demandé pour les cas spécifiques.

2.1.2.6 Atmosphères acides

- Le stockage près de sites d'industrie lourde, en particulier dans les zones où la pollution atmosphérique n'est pas régulée, peuvent entraîner des attaques chimiques sur le matériel. La contamination peut se faire sous forme de dépôts directs sur les surfaces, de pluies ou de brouillards acides. Le document « **Acid Deposition in the United Kingdom, Third Report of UK Review Groups on Acid Rain, 1990 - J G Irwin and F B Smith, Warren Springs Laboratory Stevenage** » donne des informations concernant les concentrations en acide.
- Un matériel stocké en dépôts dont les terrains d'aviation dans lesquels peuvent intervenir beaucoup de mouvements de véhicules ou de mouvements au sol des avions, est exposé à la contamination à partir des émissions d'échappement des moteurs et des unités de puissance des véhicules militaires, des équipements de soutien au sol, des groupes électrogènes ou des chariots élévateurs, etc. Les conditions climatiques prédominantes, par exemple fortes température et humidité dans les zones tropicales chaudes et humides, sont susceptibles d'aggraver les effets sur le matériel.
- En fonction du niveau de la ventilation, les vapeurs organiques dégagées par le bois, la colle, les peintures, les vernis, les résines et les protections utilisées dans la fabrication des emballages peuvent corroder. Notamment corroder les parties métalliques du matériel non emballé et stocké dans les espaces confinés. L'attaque est susceptible d'être plus grande dans les régions tropicales où les effets sont aggravés par les températures et les valeurs plus élevées de l'humidité.
- Les constituants et niveaux enregistrés de la contamination dans les atmosphères acides, et l'influence de la température, de l'humidité et des conditions topographiques, sont discutées en détail au **chapitre 8-01, partie 4 du document DEF STAN 0035**.

Les exemples des effets de contamination par les atmosphères acides sont similaires à ceux donnés aux sous-paragraphes **6.3.2 et 6.3.3 de la norme DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 6-01**. Les effets des vapeurs re-larguées par les matériaux d'emballages sont aussi donnés en **référence 2 Annexe A de cette même norme**.

Lorsqu'il est nécessaire de déterminer les effets sur le matériel d'une exposition à des atmosphères acides, le **TEST CN3 – corrosion acide (part. 3, chapitre 4.03 de la DEF-STAN 0035)** peut être utilisé. La **sévérité A (test de 28 jours)** est recommandée pour le matériel probablement exposé à des pluies ou brouillards acides provenant des sites industriels importants ou à des émissions de gaz d'échappement de moteurs à combustion interne pour une durée significative de sa durée de vie. La **sévérité B (test de 3 jours)** est recommandée pour le matériel occasionnellement exposé aux gaz d'échappement ou aux pluies acides.

2.1.2.7 Contamination par les fluides

Il peut être demandé que le matériel soit soumis à un certain niveau d'entretien/nettoyage à intervalles réguliers pendant le stockage. Cet entretien peut impliquer l'utilisation de fluides ou produits. Pendant ces entretiens des projections intempestives de ces fluides ou produits peuvent dégrader les matériels et leur niveau de finition. Le matériel stocké dans les aires utilisées pour l'entretien et la réparation de véhicules et matériels militaires peuvent être soumis à des contaminations accidentelles par des produits utilisés dans les procédures de maintenance (**DEF STAN 00-35, partie 6/3, chapitre 3-01**).

La sévérité de l'attaque chimique peut dépendre de la température du contaminant et du matériel contaminé aussi bien que de la durée de l'exposition, de plus le rayonnement solaire peut conduire à des niveaux de températures des surfaces externes supérieures à la température ambiante extérieure. Des exemples de ces derniers sont cités dans la **DEF STAN 00-35/ Partie 4/ chapitre 3-02**.

Exemples de ces types de fluides et produits contaminants :

- huiles
- huile de ricin
- Ester – phosphate
- graisses
- lubrifiants
- produits de protection
- silicone
- antigels
- produits pour joints
- solvants et liquides de nettoyage

Là où les aires de stockage et les aires d'entretien des avions ou véhicules militaires sont les mêmes, on peut citer comme exemples supplémentaires :

- carburants
- produits de dégivrage
- composants de scellés
- décontaminant nucléaire, biologique et chimique (**NBC**)

La **référence 3 de l'annexe A** donne les caractéristiques des carburants, lubrifiants et autres matériaux qui peuvent être rencontrés. La **référence 4** donne des informations sur les décontaminant chimiques et biologiques”.

Les effets typiques de contamination par les fluides sont les suivants :

- attaques chimiques de matériaux comme le caoutchouc, les plastiques, scellés et adhésifs
- changements dimensionnels de composés non métalliques
- dégradation/dissolution des revêtements de protection
- dégradation ou effacement des marques d'identification, des procédures opérationnelles et des notices de risques
- corrosion
- lessivage d'anti oxydant

La méthode de test (**DEF STAN 00-35 / Partie 3/ Chapitre 4-04**) peut être utilisée pour déterminer la résistance du matériel à une exposition à des fluides contaminants. Les fluides et les produits représentatifs de ceux probablement rencontrés durant les phases de stockage et de manutention peuvent être choisis parmi ceux listés au **chapitre 4-04**).

Les contaminants listés sont généralement reconnus comme produisant les pires exemples de chaque type de fluides contaminants en termes d'effets de dommages potentiels.

La température de chacun des fluides de test lors des phases d'application doit être aussi proche que possible de celles rencontrées en réalité, autrement il est possible d'utiliser la température spécifiée

au *chapitre 4-04* si cette donnée manque. Les spécimens sont stockés pendant 96 h à la température représentative de celle probablement rencontrée pendant le stockage

2.1.2.8 Moisissures

Bien que les conditions optimales pour la croissance des moisissures se trouvent dans les régions tropicales, il est établi que les spores peuvent se développer dans les régions tempérées ou froides du monde. Selon l'espèce, les spores de moisissures peuvent croître à des températures allant de 5 ° C à 50 ° C. Elles peuvent aussi survivre à des températures extrêmes plus élevées. Les spores peuvent être importées par le matériel stocké, si les portes d'accès ou les capots d'inspection sont temporairement ouverts pour un examen de routine et d'entretien. Le déversement accidentel de produits utilisés dans les procédures de maintenance ainsi que des excréments, comme la transpiration des mains du personnel au cours de la manipulation, peuvent fournir des nutriments dont les spores peuvent se nourrir.

Une fois que les spores sont importées, des conditions appropriées pour leur croissance peuvent être créées artificiellement, par exemple lorsque le bâtiment ou la couverture temporaire ou l'empilement des matériels stockés est tel qu'il se trouve effectivement dans une atmosphère stagnante ou semi-ventilé. L'absence d'un niveau approprié de ventilation peut aggraver les effets de l'humidité et du rayonnement solaire comme décrit au **sous-paragraphe 3.1.1** de la norme **DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 3-01** et stimuler la croissance des spores. De la même façon des microclimats peuvent être créés à l'intérieur de zones infectées de différents éléments du matériel. L'exigence d'ouvrir les trappes pour les inspections de routine assure un apport d'oxygène permettant le maintien de la croissance des spores.

Les bactéries vivent dans le sol à proximité de la surface. Les matériels conservés directement sur le sol ou en contact étroit avec lui sont vulnérables aux attaques, en particulier les matériaux utilisés dans la fabrication des emballages.

Comme les spores de moisissures, les bactéries sont responsables de la dégradation par l'obtention d'énergie à partir de réactions chimiques et par leurs déchets. Les réactions chimiques peuvent entraîner une oxydation de composés de soufre donnant de l'acide sulfurique qui peut conduire à la corrosion du matériel en contact avec le sol. La croissance et la survie des bactéries aux températures sont similaires à celle des spores de moisissures.

- Des renseignements plus détaillés sur les caractéristiques des spores de moisissures et de bactéries sont donnés au **chapitre 11-01 de la partie 4** de la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-01**.
- Beaucoup de matériaux non-métalliques contiennent des composés qui constituent des réserves de nourriture pour les champignons. Nourriture dont l'extraction peut provoquer l'altération des propriétés protectrices des finitions de surface et la réduction de la résistance mécanique.
- Les enzymes secrétées pour convertir les aliments en une forme soluble et les déchets corrosifs produits peuvent attaquer le substrat sur lequel poussent les champignons. Provoquant ainsi de l'encrassement, de la corrosion et la gravure des surfaces des lentilles et autres transparents.
- Les champignons retiennent l'humidité et ralentissent le processus de séchage ce qui diminue la résistance d'isolement et introduit des chemins conducteurs d'électricité indésirables.
- Plus d'informations sur les matériaux qui sont sensibles ou résistants aux spores de moisissure et leur croissance, sur le processus de dégradation des champignons et des effets dégradants des bactéries, sont donnés par la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-02**. et dans les **références 5 et 6 de l'annexe A de cette même norme**.
- Les exemples d'attaque bactérienne sont :
 - o Décoloration des matériaux et des finitions de surface

- o Résistance d'isolation réduite
- o Corrosion des matériaux ferreux et à un degré moindre des matériaux non ferreux.
- o Dégradation de pétrole et des huiles isolantes.
- Pour déterminer la capacité du matériel à supporter la croissance de moisissures et résister à l'attaque des spores de moisissures, *L'essai CN1 la croissance des moisissures* de la norme **DEF STAN 00-35 Part 3 Issue 4 Chapter 4-01 Test CN1 - Mould Growth** devrait être employé. Une information fiable sur la résistance du matériel est aisément obtenue à partir d'essais effectués sur des matériaux, des composants et des montages témoin partiels.

Les durées des périodes d'incubation dépendent du but de l'essai comme suit :

Procédure d'essais A

- Exposition de 28 jours pour les essais du matériel qui, une fois en service, est protégé de la contamination directe par des substances qui sont des éléments nutritifs des spores de moisissures.
- Exposition de 84 jours pour du matériel d'essai, où les effets sur les performances fonctionnelles doivent également être évalués.

Procédure d'essais B

- Exposition de 28 jours où il est prévu que, lorsqu'il est en service, l'élément d'essai sera contaminé avec des substances nutritives qui favorisent la croissance des moisissures, comme les poussières organiques, les substances volatiles condensées, les graisses, etc.

Deux échantillons d'essai (ou des ensembles de spécimens) sont recommandés pour les essais pour déterminer les effets sur la performance opérationnelle et la contamination par des substances nutritives.

Dans ce cas, le deuxième échantillon est soumis à la chaleur, aux conditions de stockage humide sans inoculation, afin de mettre en évidence les effets liés à une exposition à des conditions humides et à la chaleur seule.

Toutefois, il peut être opportun de ne pas suivre cette recommandation dans laquelle le programme de test nécessite des tests d'humidité distincts qui seront réalisées sur des échantillons identiques. Davantage de conseil devra être recherché auprès des agences spécialisées dans les tests de moisissures.

2.1.2.9 Faune

Les installations fixes et non mobiles, en particulier celles où des aliments sont susceptibles d'être stockés, préparés et / ou consommés, sont potentiellement attrayantes pour les animaux sauvages. De même pour des endroits tempérés ou un abri avec des sources de subsistance.

Les matériaux utilisés dans la fabrication des matériels installés sont passibles d'une agression physique de la faune sauvage soit :

- Comme sources de nourriture.
- Parce qu'elles constituent des barrières à cette faune sauvage.
- Comme matériel de nidification entraînant attaque chimique et biologique par les excréments.

Les matériaux d'origine animale ou végétale seront attaqués par les insectes comme source de nourriture. Tandis que d'autres tels que les plastiques, les caoutchoucs et les matériaux utilisés dans les finitions de surface sont susceptibles d'être pénétrées si elles forment une barrière à l'accès à la nourriture.

Les dommages physiques causés par les animaux sauvages rongant les emballages et les capots de protection exposent les contenus à des entrées conséquentes d'humidité, d'agents chimiques et

d'infection par les moisissures et des bactéries. La détérioration des torons de câbles et de la tuyauterie peut aboutir à des équipements non sûrs ou non utilisables.

Plus d'informations détaillées sur l'attaque du matériel par les insectes et les rongeurs, spécialement pour des déploiements en régions tropicales sont données dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-01**

Comme il n'y a pas de méthodes de tests standards reconnues pour le matériel soumis à la vie sauvage, des essais en sites réels peuvent être conduits dans des zones reconnues comme lieux d'habitat de ce type de faune.

Référence des dommages dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-01 et 11-02**

2.2 Mise en œuvre

2.2.1 Déploiement sur installations fixes

2.2.1.1 Haute et basse température

Les hautes et basses températures subies par les matériels installés ou déployés sur les installations non mobiles et fixes peuvent affecter les propriétés de base des matériaux utilisés pour leur construction.

Les changements provisoires ou permanents des dimensions des composants structuraux dus à la dilatation et à la contraction des matériaux, accompagnées d'une diminution de la résistance mécanique et de changements de ductilité, peuvent avoir comme conséquence le contact ou la séparation entre les pièces adjacentes, l'application de niveaux de contrainte et de déformation inacceptables conduisant à des déformations ou à une rupture mécanique.

Les variations des caractéristiques des composants électriques et électroniques liées à la température peuvent réduire les performances et la fiabilité des systèmes de communication, de commande, de surveillance et des systèmes de pilotage des armes.

Les températures extrêmes peuvent conduire à des défauts dans les joints soudés et collés entre différents éléments des matériels.

Les changements des propriétés des lubrifiants et des caractéristiques des systèmes d'isolation des chocs et des vibrations liés à la température peuvent réduire leur efficacité et leur durée de vie ou conduire à la défaillance totale des systèmes soumis à des environnements mécaniques et à des frottements.

Les effets des basses et hautes températures sur les matériels sont discutés avec plus de détails dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 2-02**.

2.2.1.2 Humidité haute et basse

Une exposition directe à des conditions météorologiques extrêmes peut conduire les matériels à subir des conditions de chaleur humide. A l'intérieur des bâtiments et des installations fixes comme à l'intérieur des équipements individuels, cette exposition peut produire des taux de dégradation importants et une grande fréquence de panne des équipements.

Il peut en résulter un gonflement et une détérioration générale des matériaux, y compris le conditionnement, provoqué par absorption et adsorption d'humidité conduisant à une réduction de la résistance mécanique.

Le cheminement de l'humidité peut mener à une réduction ou à une suppression de la résistance d'isolation des circuits et des composants avec pour conséquence des risques en matière de sécurité, une performance dégradée, une fiabilité réduite ou une défaillance totale des systèmes électriques et électroniques. La performance des systèmes optiques peut être réduite par brouillard et dépôts d'humidité sur les lentilles.

Les atmosphères humides chaudes dans des secteurs non aérés fournissent des conditions idéales pour la croissance de moisissures (voir le paragraphe 2.1.2.9 Moisissures) et la corrosion galvanique et aggravent l'attaque par les agents corrosifs. La **référence 1 de la norme DEF STAN 00-35 Part 4**

Issue 4 Chapter 2-02 10 References and Other Sources of Information 10.1 References liste les problèmes de protection des matériels contre les effets de la vapeur d'eau dans l'atmosphère aggravés par des hautes températures.

Les effets de l'humidité sur les matériels, l'obtention et le maintien d'un milieu sec à l'intérieur des matériels, les normes et les méthodes de cachetage, les barrières de vapeur d'eau, les procédures de séchage et l'indication des niveaux de l'humidité sont concernés.

Les faibles niveaux d'humidité induits peuvent réduire la teneur en eau des matériaux employés dans la fabrication des composants électroniques/électriques, changeant leurs caractéristiques relatives à la stabilité qui maintient la performance des systèmes dans les tolérances spécifiées. L'efficacité en fonctionnement des systèmes mécaniques peut être réduite du fait de la dégradation des lubrifiants par des atmosphères sèches et humides.

Les effets des bas et hauts niveaux d'humidité sur les matériels et les équipements sont discutés dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 4-02**. La **référence 1 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 3-01 Annex A** fournit des informations sur la protection des matériels contre les effets des atmosphères chargées d'humidité. Les effets sur les matériels, la réalisation et le maintien des enceintes sèches, les normes et les méthodes de marquage, les barrières à la vapeur d'eau et procédures de séchage y sont discutés.

2.2.1.3 Pression d'air supérieure à la pression atmosphérique

Une pression d'air supérieure à la pression atmosphérique locale peut être utilisée dans certaines installations afin d'empêcher l'entrée d'air contaminé dans le cas d'une attaque nucléaire, chimique ou biologique. Les niveaux de surpression doivent être déterminés en se référant aux documents relatifs aux exigences opérationnelles et environnementales pour l'application particulière et à l'avis demandé aux utilisateurs de l'installation fixe.

2.2.1.4 Sable et poussières

Les effets typiques des atmosphères chargées en poussière et sable sur les matériels se traduisent par une altération des performances des systèmes optiques due à l'accumulation de particules sur les lentilles et les milieux transparents, la rayure des surfaces extérieures menant à la corrosion des matériaux sous-jacents, des courts-circuits des isolateurs électriques, le colmatage des ouvertures et des filtres réduisant l'efficacité des systèmes de refroidissement et de ventilation

Les dépôts de poussière sur et dans les équipements installés, sur les surfaces externes et dans les installations fixes, peuvent conduire : à des courts-circuits, à la création et au cheminement d'électricité statique, au contact entre des pièces mobiles et à la contamination des systèmes de lubrification. Ces effets et d'autres possibles sont décrits avec plus de détails dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 9-02**.

2.2.1.5 Atmosphère saline

Divers défauts peuvent résulter de l'interaction des processus de corrosion et des caractéristiques de conception des matériels, par exemple la proximité de métaux différents (corrosion bimétallique), l'action combinée de la corrosion et de forces mécaniques (fatigue-corrosion, contrainte et fretting-corrosion) et la fragilisation des aciers à haute limite élastique (fragilisation par l'hydrogène).

Les mécanismes et les facteurs influençant le taux de corrosion du métal et la détérioration des substances non métalliques sont discutés plus en détail dans la **référence 2 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 3-01 Annex A** et dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-02**. L'avis de spécialistes devrait être demandé pour les cas spécifiques

2.2.1.6 Atmosphère acide

Les exemples donnés dans les **sous-paragrophes 6.3.3, 6.3.4 et 6.3.5** de la norme **DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 3-01** sont représentatifs des effets de l'exposition aux atmosphères acides sur les matériels. Des informations supplémentaires sont fournies dans la **référence 2 de DEF**

STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 3-01 Annex A et dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-02**.

2.2.1.7 Contamination par les fluides

Les effets typiques de la contamination par des fluides sont les suivants:

- Attaque chimique des matériaux, par exemple : le caoutchouc, les plastiques, les mastics et les adhésifs ayant pour résultat un gonflement ou un rétrécissement, une fissuration, une décoloration, des fuites au niveau des joints et un décollement des joints collés.
- Changements dimensionnels pour les composants non métalliques.
- Dégradation/dissolution des revêtements de protection.
- Dégradation/effacement des étiquettes d'identification, des modes opératoires et des mises en garde de sécurité.
- Corrosion
- Lixiviation des antioxydants.

2.2.1.8 Moisissures

On trouvera ci-dessous des exemples de dégradation des matériels dues à l'attaque bactérienne :

- Décoloration des matériaux et des états de surface
- Réduction de la résistance d'isolation
- Corrosion des matériaux ferreux et à un moindre degré des matériaux non ferreux.
- Dégradation des pétroles et des huiles isolantes.

Des informations détaillées sur les matériaux sensibles et sur ceux qui sont résistants aux spores des moisissures et aux processus de dégradation des moisissures sont fournies dans les **références 5 et 6 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 3-01 Annex A** et dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-02**.

Le **chapitre 11-02 de la partie 4** fournit des informations plus détaillées sur les effets dégradants des bactéries sur les matériels.

2.2.1.9 Faune

Les dommages physiques provoqués par les rongeurs sur les emballages et les dispositifs de protection exposent le contenu à l'entrée consécutive : d'humidité, d'agents chimiques, à l'apparition de moisissures et à l'infection par des bactéries. La mastication des câbles et des canalisations peut conduire à un risque en matière de sécurité pour le personnel de service ou à un fonctionnement défectueux de l'équipement.

La norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-01** fournit des informations plus détaillées sur l'attaque des matériels par les insectes et les rongeurs, particulièrement dans les régions tropicales.

2.2.2 **Déploiements et mise à poste sur véhicule**

2.2.2.1 Température

2.2.2.1.1 Hautes températures

Les exemples des effets ou des défauts potentiellement préjudiciables résultant des températures élevées sont :

- une résistance réduite et une plus grande élasticité des matériaux causant une surcharge,
- des changements dimensionnels et une dilatation thermique différentielle causant sur les éléments structuraux et mécaniques :
 - o une déformation et une défaillance des composants structuraux,
 - o un blocage des pièces mobiles,
 - o une défaillance des joints collés,
- des changements dimensionnels et une déformation des garnitures et des joints réduisant l'efficacité à rendre hermétique,

- une fusion et exsudation des matériaux non métalliques. Probablement en raison des changements dimensionnels et d'une déformation des garnitures et des joints,
- un fonctionnement involontaire des dispositifs thermiquement activés,
- des changements des caractéristiques des systèmes d'isolement de choc et de vibration,
- une surcharge des systèmes de refroidissement ayant pour résultat :
 - o des changements de caractéristiques des composants électriques et électroniques,
 - o une défaillance des connexions internes des composants électroniques,
 - o des performances amoindries ou une défaillance des systèmes électriques et électroniques,
- une accumulation de l'électricité statique particulièrement là où l'humidité est basse.
- un vieillissement accéléré et une fissuration, une décoloration des finitions protectrices,
 - o une plus grande vitesse de combustion des propulseurs et de détonation des explosifs,
 - o une viscosité réduite des lubrifiants entraînant une moindre efficacité des systèmes de lubrification.

2.2.2.1.2 Basse température

Les exemples des effets ou des défauts potentiellement préjudiciables provoqués par de basses températures sont :

- une fragilisation et une élasticité réduite des matériaux (spécialement non métalliques), réduisant la résistance au choc mécanique,
- une fatigue statique du verre contraint,
- des changements dimensionnels et une contraction thermique différentielle causant pour les éléments structuraux et mécaniques :
 - o une déformation et une défaillance des composants structuraux,
 - o un blocage des systèmes mécaniques,
 - o une défaillance des joints collés,
- des changements des caractéristiques des systèmes d'isolement de choc et de vibration,
- une performance réduite des batteries,
- des changements dans les caractéristiques de composants électriques et électroniques menant à :
 - o une défaillance des connexions externes et internes des composants électroniques,
 - o une performance dégradée et une défaillance des systèmes électriques et électroniques,
- une plus grande viscosité des lubrifiants réduisant la performance des systèmes mécaniques,
- une vitesse de combustion réduite des propulseurs et de détonation des explosifs.

2.2.2.2 Humidité

La référence 1 DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 3-01 Annex A donne des conseils sur la protection du matériel contre les effets des atmosphères chargées en humidité. Les effets sur les matériaux, la réalisation de boîtiers étanche et le maintien de l'étanchéité, des méthodes pour rendre hermétique, des barrières à la pénétration de la vapeur d'eau et des procédures de séchage sont décrites.

2.2.2.2.1 Humidité élevée

Les exemples des effets de l'exposition à la chaleur humide sont :

- un gonflement et une détérioration générale des matériaux dus à l'absorption de l'eau et causant:
 - o une réduction de résistance mécanique,
 - o une performance dégradée de composants électriques et électroniques,
 - o un poids accru.
- une absorption et/ou une adsorption de l'humidité réduisant la résistance d'isolation causant des résistances de fuites dans les circuits électriques et électroniques,

- une performance dégradée ou une défaillance des systèmes électriques et électroniques et de composants dus aux problèmes évoqués aux paragraphes ci-dessus,
- une corrosion galvanique des parties et des composants métalliques particulièrement dans les secteurs où la contrainte appliquée est élevée,
- une création de microenvironnements provoqués par l'humidité enfermée encourageant une attaque chimique et biologique (souvent cachés).

2.2.2.2.2 Humidité faible

Les exemples des effets de l'humidité très faible sont :

- Un dessèchement excessif, ayant pour résultat une perte de caractéristiques de quelques matériaux,
- Des changements des caractéristiques des composants électroniques et électriques affectant la stabilité et l'exactitude des systèmes électroniques,
- Un cheminement et une isolation réduite particulièrement lorsque combiné avec de la poussière,
- Un frottement excessif et des pertes électriques dans les collecteurs et les bagues coulissantes ayant pour résultat des accroissements de température et l'usure prématurées des parties en frottement.

2.2.2.3 Pression

Les niveaux de surpression employés pour protéger des cavités sont faibles. Les matériels sensibles à la pression sont conçus pour répondre à de petites variations de pression. Aussi les parois de ces récipients, partiellement scellés avec des faibles de taux de fuite, ne permettent pas de suivre de rapides variations de pression extérieure et peuvent être affectées de déformations provisoires ou permanentes.

2.2.2.4 Glace

La glace, le givrage ou la congélation de l'humidité emprisonnée peuvent avoir pour conséquence le colmatage ou le blocage des systèmes mécaniques et électromécaniques.

2.2.2.5 Sable et poussière

Les exemples des effets et des défauts provoqués par la poussière et le sable sont :

- Le colmatage des ouvertures, l'efficacité réduite de la ventilation et du système de refroidissement,
- La rayure et la gravure des objectifs, des panneaux transparents et des finitions de surface entraînant :
 - o Une performance altérée des systèmes optiques,
 - o Une corrosion des matériaux vitaux exposés.
- Le blocage des dispositifs mécaniques,
- Des dépôts sur des systèmes électronique/électrique causant :
 - o Une accumulation d'électricité statique,
 - o L'introduction de résistance de fuites électriques non désirées,
 - o Une performance dégradée ou une défaillance,
 - o La souillure des systèmes de lubrification.

2.2.2.6 Immersion, précipitation et jet

Les effets d'aspersions d'eau ou d'immersion partielle dépendront de l'imperméabilité des portes du matériel et des trappes ou des caissons protecteurs. L'humidité accumulée intérieurement peut produire des effets semblables à ceux déjà énumérés dans le **paragraphe 3.2.1.** de la norme **DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 9-01**, dépendant des dispositions prises pour le drainage.

2.2.2.7 Atmosphère acide

Du matériel transporté ou situé à proximité de l'échappement des moteurs est passible d'une attaque chimique par les gaz corrosifs, les vapeurs et les particules émis par les échappements. La gravité de l'attaque dépendra de la durée d'exposition, de la présence d'humidité, de la température des émissions et du type de matériel exposé.

La combinaison des gaz chauds et du taux d'humidité peut accélérer les attaques chimiques et électrochimiques. Un exemple typique est le départ à froid avec des paramètres de combustion riche et des formations de rosée sur les surfaces exposées.

L'attaque chimique industrielle peut aussi être provoquée par les véhicules avoisinants ou par la situation géographique de la zone de déploiement dans un site industriel.

Une combinaison des attaques chimiques peut avoir lieu entre la propre émission du matériel et celles rencontrées dans des zones où il existe un grand nombre de véhicules en mouvements, des mouvements d'aéronefs au sol, des émissions de moteurs, de groupes électrogènes, du conditionnement d'air et de l'équipement de soutien au sol.

Si la zone de déploiement est proche de sites industriels lourds cela peut conduire à une attaque chimique, soit sous forme directe (dépôt de particules) ou à l'évaporation de l'humidité contaminée, ou sous forme de pluie acide.

Les effets sont susceptibles d'être pire quand le déploiement en un tel lieu se produit dans les régions chaudes, tropicales humides où la combinaison de la température de l'air, le rayonnement solaire et le taux d'humidité accélèrent l'attaque des agents polluants contenus dans l'atmosphère.

Les niveaux de contamination pour une application particulière peuvent être plus précisément déterminés à partir de la probabilité de la fréquence de présence du matériel dans les régions susceptibles à de telles conditions et évalués au travers d'expériences antérieures vécues pour ce type d'environnement.

2.2.2.8 Contamination par les fluides

Le matériel est susceptible de subir une contamination occasionnelle due à un déversement accidentel ou par des éclaboussures de fluides utilisés dans l'entretien et la maintenance du véhicule hôte ou de l'équipement à bord. Cette contamination fait suite à des fuites de fluides nécessaires au bon fonctionnement du véhicule dont l'origine peut être due à l'usure, à un choc accidentel avec du matériel transporté. Généralement les emplacements vulnérables sont les tuyaux, les canalisations et les réservoirs. Une contamination intentionnelle mais non voulue peut se produire pendant le nettoyage, les opérations de dégivrage ou l'application de substances protectrices.

Le matériel peut être contaminé par les produits suivants :

- Carburants
- Huiles
 - o Lubrifiant
 - o Hydraulique
 - o Huile de ricin
 - o Pétrole basé
 - o Ester de phosphate
- Graisses
 - o Lubrifiant
 - o Protecteur
- Fluides hydrauliques
- Fluides de silicone
- Antigél
- Fluides de dégivrage
- Dissolvants et liquides de nettoyage
- Eaux usées
- Insecticides

- Réfrigérants
- Extincteurs du feu
- Décontaminants biologiques et chimiques nucléaires (NBC).

Les références suivantes donnent des caractéristiques des fluides pouvant être employés en opération et lors de l'entretien des équipements du bâtiment naval et d'autres matériels pouvant être transportés par le navire ou déployés sur lui; la dernière fournit l'information sur les décontaminants chimiques et biologiques.

- ***QSTAG 361 Chemical Environmental Contaminants Affecting the Design of Materiel.***
- ***QSTAG 362 Fungal Contamination affecting the Design of Military Materiel.BS2011 Part 2.1R (IEC 60068-2-18) Test R Water and Guidance.***
- ***DEF STAN 08-41, Chemical and Biological Hardening of Military Equipment, Part 1, General Requirements, Assessment and Testing***

L'équipement installé dans des véhicules spécialisés comme pour la restauration, la blanchisserie et les services médicaux peuvent être contaminés avec les boissons, produits de nettoyage et d'insecticides.

La gravité de l'attaque chimique dépend de la température du contaminant et du matériel contaminé, soit au moment ou après la contamination survenue, par exemple le rayonnement solaire fera augmenter la température des surfaces extérieures et la température de l'air ambiant risquant ainsi d'augmenter les réactions chimiques.

Les effets typiques de la contamination par des fluides sont les suivants:

- L'attaque chimique des matériaux, par exemple caoutchouc, plastiques, produits d'étanchéité, adhésifs entraînant un gonflement ou un rétrécissement, la fissuration, la décoloration, les fuites à travers les joints et la perte d'étanchéité des joints collés. Des variations dimensionnelles des éléments non métalliques.
- La dissolution des revêtements protecteurs.
- L'altération / l'effacement des étiquettes d'identification, des procédures d'exploitation et du risque d'alerte.
- De la corrosion
- Le lessivage des antioxydants.

2.2.2.9 Moisissures

Bien que les conditions optimales pour la croissance des moisissures se trouvent dans les régions tropicales, il est établi que les spores peuvent se développer dans les régions tempérées ou froides du monde. Suivant l'espèce, les spores de moisissures peuvent croître à des températures allant de 5 ° C à 50 ° C. Elles survivent aussi à des températures extrêmes plus grandes.

Les spores peuvent contaminer le matériel lorsque les portes d'accès, trappes d'inspection ou capots de protection sont temporairement déposés pour examen de routine, de maintenance et lors de contrôles de performance.

Le déversement accidentel de matériaux utilisés dans les procédures de maintenance et des excréments comme la transpiration des mains du personnel au cours de la manipulation, peuvent fournir des nutriments nourrissant les spores.

Une fois que les spores sont présentes, les conditions appropriées pour la croissance peuvent être créées artificiellement, par exemple si l'équipement est placé dans le véhicule à en endroit où ils stagnent ou dans une ambiance mal ventilée.

L'absence de ventilation couplée avec une forte humidité et le rayonnement solaire peuvent aggraver les effets et favoriser la croissance des spores. D'une façon similaire des micro-climats peuvent être créés dans les zones infectées du matériel.

Ouvrir les trappes d'inspection régulièrement assure un apport d'oxygène maintenant la croissance. Beaucoup de matériaux non métalliques renferment des composés qui constituent une source de

nutriments pour les champignons, dont l'extraction peut conduire à une moindre efficacité des revêtements de protection de surface, et à une baisse des propriétés mécaniques.

Les enzymes sécrétées convertissent les aliments en une forme soluble et les déchets corrosifs produits peuvent attaquer le substrat sur lequel poussent des champignons. Ce qui provoque l'encrassement et la corrosion, efface la gravure des surfaces et modifie les transparences.

Les champignons retiennent l'humidité et ralentissent le processus de séchage, ce qui est de nature à diminuer la résistance d'isolement et d'introduire d'indésirables chemins conducteurs d'électricité.

2.2.3 Déploiement sur bâtiment naval

2.2.3.1 Température

Les températures induites hautes et basses peuvent affecter les propriétés de base des matériaux employés dans la construction du matériel. Ces températures peuvent provoquer des modifications temporaires ou permanentes des dimensions des composants structurels dus à la dilatation et à la contraction des matériaux, accompagnée de la réduction des propriétés mécaniques telles que la ductilité.

Des réactions chimiques, et des variations des caractéristiques électriques peuvent réduire la performance opérationnelle, causer la défaillance de fonctionnement, réduire la fiabilité ou causer la défaillance totale des systèmes et des composants.

Le choc thermique induit des taux élevés de dilatation et de contraction. Ce qui a pour résultat l'accroissement des contraintes et la rupture des matériaux, la défaillance des joints collés et la performance dégradée des joints d'étanchéité.

2.2.3.2 L'humidité

Les zones humides intérieures créées par la chaleur engendrée sous les bâches provisoires du pont principal, ou dans les compartiments non conditionnés sont propres à accélérer la dégradation des matériaux et la fréquence des défauts de fonctionnement des équipements par rapport à l'exposition directe aux conditions météorologiques naturelles extérieures.

La dégradation des performances ou la diminution de la résistance d'isolement des circuits et des composants est susceptible de causer la défaillance du matériel de sécurité, la dégradation de la fiabilité et l'avarie des systèmes électriques et électroniques. La performance des systèmes optiques peut être réduite par le brouillard et le dépôt d'humidité sur les objectifs.

Les atmosphères humides et chaudes dans des enceintes non aérées offrent les conditions idéales pour la croissance fongique et une attaque aggravée des agents corrosifs. Les facteurs additionnels viennent de l'humidité agissant sur le matériel.

La réalisation de boîtiers étanches dans la durée ; les techniques pour les rendre hermétiques, les mesures contre la pénétration de vapeur d'eau, les procédures de séchage et l'indication des niveaux d'humidité permettront de lutter contre cette croissance fongique.

Les niveaux bas d'humidité peuvent réduire la teneur en eau des matériels employés dans la fabrication des composants électroniques et électriques. Ils changent leurs caractéristiques et affectent la stabilité qui est nécessaire au maintien des performances, dans les tolérances spécifiées, des systèmes. En atmosphère sèche ou humide l'efficacité opérationnelle des systèmes mécaniques peut être réduite par la dégradation des lubrifiants.

2.2.3.3 Pression atmosphérique

Le matériel scellé ou partiellement scellé avec de bas taux de fuite peut être l'objet d'une déformation provisoire ou de dommages mécaniques permanents s'il est situé dans des compartiments qui utilisent la surpression pour améliorer l'étanchéité.

Les dispositifs protecteurs des matériels de grande dimension soumis aux variations de la pression atmosphérique standard peuvent être, aussi, un sujet de préoccupation,

Soumis à une pression hydrostatique les matériels scellés sont sensibles à la déformation structurale. Déformation qui peut altérer l'intégrité des joints, permettre l'entrée de l'eau ou l'évasion de tous les fluides et gaz contenus.

2.2.3.4 Glace

Comme les manœuvres des bâtiments navals de surface peuvent influencer la profondeur et le type de givrage, le dépôt de glace sur les matériels situés sur le pont principal sera considéré comme équivalent au dépôt de glace intervenant en champ libre naturel.

Les commandes des mécanismes de déclenchement et des systèmes de mise en action des armes peuvent être altérées ou complètement bloquées du fait des interférences de la carapace de glace. Le givrage et la formation de glace sur les sondes et les circuits optiques peuvent réduire la performance des systèmes de surveillance et de navigation.

Les effets de la glace sur le matériel installé sur le pont principal sont, par exemple, le défaut de fonctionnement des tringleries, des mécanismes de déclenchement et des systèmes de mise en action des armes.

2.2.3.5 Précipitation et jet

Le matériel soumis à l'immersion, aux précipitations et aux jets, est susceptible de subir des entrées d'eau par les ouvertures et les joints et de l'infiltration affectant les matériaux et la performance opérationnelle de l'équipement de la même manière que l'accumulation d'humidité.

Pour le matériel installé ou stocké dans des salles de moteur et de générateur, ateliers, blanchisseries et offices; il y a une plus grande probabilité de subir une certaine forme de mouillage ou d'immersion partielle due à la condensation, à des ruptures et à des joints disjoints sur des conduites d'eau. Des sévérités jusqu'à $280 \text{ litres/m}^2/\text{h}$ doivent être prises en compte pour les précipitations et des profondeurs d'immersion allant jusqu'à 150 millimètres .

2.2.3.6 Atmosphère et solution saline

Les exemples d'effets sur le matériel de l'exposition aux atmosphères salines sont :

- la corrosion des métaux par action électrochimique,
- le boursoufflement des revêtements de protection par électrolyte,
- la formation de dépôts conducteurs causant le défaut de fonctionnement de circuits électriques et/ou électroniques,
- le fendillement et la fissuration en surface des plastiques et du caoutchouc,
- la décoloration et la perte de transparence,
- l'accroissement ou la diminution de résistance à la traction, de fragilisation et de perte des propriétés électriques des matériaux non métalliques,
- le blocage ou la difficulté des pièces mobiles à se mouvoir,
- la gravure chimique des objectifs des systèmes optiques.

Divers défauts peuvent résulter de l'interaction des processus de corrosion et des caractéristiques de conception des matériels.

Par exemple :

- la proximité de métaux différents engendre la corrosion bimétallique,
- l'action combinée de la corrosion et de forces mécaniques génère de la fatigue par corrosion et du fretting-corrosion,
- la fragilisation par l'hydrogène des aciers à haute limite élastique.

Des conseils et des informations sur ces questions sont donnés en référence ci-après. Le conseil devrait être recherché auprès de spécialiste dans des cas particuliers: ***Naval Engineering Standard NES 1004 Requirements for the Design and Testing of Equipment to Meet Environmental***

2.2.3.7 Atmosphères acides

Les exemples des effets sur les matériels exposés aux atmosphères acides sont semblables à ceux donnés dans le sous-paragraphe ci dessus pour les atmosphères salines. Des informations supplémentaires sont fournies en **référence 5 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 9-01 Annex A et par DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-02.**

2.2.3.8 Contamination par fluides

Le matériel installé sur les navires de surface peut, de temps en temps, être contaminé par divers fluides et composés utilisés dans le fonctionnement, la mise en œuvre des servitudes, l'entretien des bâtiments navals et de leurs machines, des véhicules, des avions et de la cargaison déployés sur ce bâtiment naval.

La contamination peut être accidentelle lors d'éclaboussures ou de débordement, de fuite des récipients et des systèmes de distribution, ou intentionnel, comme lors du nettoyage, du dégivrage, ou de la décontamination après une attaque chimique ou biologique ou lors de l'utilisation des extincteurs,

Les types de contamination par les fluides dépendront de l'activité effectuée dans le secteur du bâtiment naval où le matériel est installé, par exemple, dans les chambres de machines, ateliers, hangars, offices et blanchisseries,

La sévérité lors de la contamination par les fluides dépendra de la corrosivité, durée d'exposition et des températures du matériel et du contaminant. Les températures peuvent aller de l'ambiante locale (y compris les effets du rayonnement solaire), aux températures de fonctionnement élevées du matériel et de l'agent contaminant.

Des exemples de types de liquide ou de composés contaminant le matériel sont :

- Carburants
- Huiles
 - o Lubrifiant
 - o Hydraulique
 - o Huile de ricin base
 - o Pétrole base
 - o Ester de phosphate base
- Graisses
 - o Lubrifiant
 - o Protecteur
- Fluides hydrauliques
- Fluides de silicone
- Antigél
- Fluides de dégivrage
- Dissolvants et liquides de nettoyage
- Eaux usées
- Insecticides
- Réfrigérants
- Extincteurs du feu
- Décontaminants biologiques et chimiques nucléaires (NBC).

Les références suivantes donnent les caractéristiques des fluides qui peuvent être employés en opération et lors de l'entretien des équipements du bâtiment naval. Ainsi que d'autres matériels pouvant être transportés par le navire ou déployés sur lui.

La dernière fournit l'information sur les décontaminants chimiques et biologiques.

- **QSTAG 361 Chemical Environmental Contaminants Affecting the Design of Materiel.**
- **QSTAG 362 Fungal Contamination affecting the Design of Military Materiel.**
- **BS2011 Part 2.1R (IEC 60068-2-18) Test R Water and Guidance.**

- **DEF STAN 08-41, Chemical and Biological Hardening of Military Equipment, Part 1, General Requirements, Assessment and Testing.**

2.2.3.9 Moisissures

- Beaucoup de matériaux non métalliques employés dans la construction des matériels renferment des composés qui constituent une source de nutriments pour les champignons, dont l'extraction peut conduire à une moindre efficacité des revêtements de protection de surface, et à une baisse des propriétés mécaniques des adhésifs.
- Les enzymes secrétées pour convertir les aliments en une forme soluble et les déchets corrosifs produits peuvent attaquer le substrat sur lequel poussent les champignons. Provoquant ainsi de l'encrassement, de la corrosion et la gravure des surfaces des lentilles et autres transparents.
- Les champignons retiennent l'humidité et ralentissent le processus de séchage ce qui diminue la résistance d'isolement et introduit des chemins conducteurs d'électricité indésirables.
- Plus d'informations détaillées sur les matériaux qui sont susceptibles et ceux qui sont résistant aux moisissures et aux processus de dégradation par les champignons sont données dans les références suivantes:
 - o **QSTAG 362 Fungal Contamination affecting the Design of Military Materiel.**
 - o **BS 2011 Part 2.1J (IEC 60068-2-10) Test J and Guidance. Mould Growth. Appendix A.**

2.2.4 **Déploiement sur les sous-marins**

2.2.4.1 Température et humidité

Les effets potentiellement préjudiciables des conditions de la température et d'humidité sur des équipements de bord sont semblables à ceux indiquées dans les **paragraphes 2.2.3.1 et 2.2.3.2** ci-dessus. Mais à moins que l'équipement soit, en particulier, sensible ou situé dans un secteur mal aéré, les dégradations des matériaux et les effets sur les performances seront moins prononcés. Pour les matériels installés sur la coque extérieure, on pourra s'inspirer des effets présentés au **paragraphe 2.1.1.1 et 2.1.1.2**

Pour les matériels installés dans les salles de machine et de service, on pourra se référer aux effets décrits au **paragraphe 2.2.1.2**

2.2.4.2 Surpression

Le matériel contenant des composants pressurisés, éjectés ou équipé de volumes fermés partiellement scellés avec de bas taux de fuite, peut être affecté par des dégradations provisoires ou permanentes.

2.2.4.3 Précipitation, embruns et immersion

Le matériel soumis à l'immersion, précipitation et embruns est exposé à des entrées d'eau par les ouvertures et les joints, donc à des performances dégradées. L'absorption et l'adsorption de l'humidité et de la condensation peuvent entraîner la détérioration des matériaux et des finitions de surface utilisées dans la construction du matériel.

La réduction de résistance d'isolation peut avoir comme conséquence des performances dégradées, une réduction de la fiabilité et des risques en matière de sécurité pour les matériels électriques et électroniques. Brumisation et dépôts de condensats sur les composants optiques et les transparents des écrans de visualisation peuvent réduire l'efficacité du fonctionnement de la surveillance, des sonars, des armes et des systèmes de contrôle de tir

2.2.4.4 Atmosphère et solution saline

Les exemples d'effets sur le matériel de l'exposition aux atmosphères salines sont :

- La corrosion des métaux par action électrochimique,

- Le boursoufflage des revêtements de protection par électrolyte,
- La formation de dépôts conducteurs causant le défaut de fonctionnement de circuits électriques et/ou électroniques,
- Le fendillement et la fissuration en surface des plastiques et du caoutchouc,
- La décoloration et la perte de transparence,
- L'accroissement ou la diminution de résistance à la traction, de fragilisation et de perte des propriétés électriques des matériaux non métalliques,
- Le blocage ou la difficulté des pièces mobiles à se mouvoir,
- La gravure chimique des objectifs des systèmes optiques.

Divers défauts peuvent résulter de l'interaction des processus de corrosion et des caractéristiques de conception des matériels.

Par exemple :

- la proximité de métaux différents engendre la corrosion bimétallique,
- l'action combinée de la corrosion et de forces mécaniques génère de la fatigue par corrosion et du fretting-corrosion,
- la fragilisation par l'hydrogène des aciers à haute limite élastique.

Des conseils et des informations sur ces questions sont donnés en référence ci après. Le conseil devrait être recherché auprès de spécialiste dans des cas particuliers: ***Naval Engineering Standard NES 1004 Requirements for the Design and Testing of Equipment to Meet Environmental***

2.2.4.5 Atmosphères acides

Des exemples d'effets potentiellement endommageant de l'exposition à l'atmosphère acide pour le matériel sont semblables à ceux données au paragraphe des effets des solutions salines. Les informations supplémentaires sont fournies en ***référence 2 de l'annexe A et DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-02. (Tailoring Shipboard Environmental Specifications: R. H. Chalmers, Naval Ocean Systems Centre, San Diego, California, Journal Of Institute Of Environmental Science, March/April 1999).***

2.2.4.6 Contamination par les fluides

Les effets typiques de la contamination par des fluides sont :

- l'attaque chimique des matériaux tels que les caoutchoucs, les plastiques, les mastics et les adhésifs ayant pour résultat le gonflement, le rétrécissement, la fissuration, la décoloration, les fuites, et la défaillance des joints collés,
- les changements dimensionnels des composants,
- le boursoufflage et la dissolution de revêtements de protection et de finition d'état de surface,
- la défiguration et l'effacement des consignes de mises en garde entraînant un risque de sécurité dans la mise en œuvre du matériel,
- la corrosion,
- le lessivage des antioxydants,
- la réduction de résistance d'isolation.

2.2.4.7 Moisissures

Les enzymes secrétées pour convertir la nourriture en forme soluble et déchets corrosifs peut attaquer le substrat sur lequel les champignons se développent. Ce qui entraîne la salissure et la corrosion des finitions de surface et le ternissement des surfaces transparentes.

Les champignons maintiennent l'humidité et ralentissent le processus de séchage ce qui réduit la résistance d'isolation et crée des chemins conducteurs d'électricité non désirés.

Davantage d'informations détaillées sur les matériaux qui sont vulnérables et ceux qui sont résistant aux moisissures et aux processus de dégradation par les champignons sont données dans les

références 5 et 6 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 9-02 Annex A et DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-02.

2.2.5 Déploiement sur les aéronefs

2.2.5.1 Température

Les températures haute et basse éprouvées par le matériel sur les avions peuvent affecter les propriétés physiques et chimiques des matériaux employés dans la fabrication. La dilatation et la contraction des composants structuraux accompagnés d'une réduction de résistance mécanique et des changements de ductilité provoquent : l'interférence et la désolidarisation entre les pièces adjacentes et imposent des niveaux inacceptables d'effort et de contrainte, pouvant mener à la déformation permanente ou à la rupture mécanique.

Les variations des caractéristiques des composants électriques et électroniques et les changements de viscosité des lubrifiants réduisent l'exactitude, la fiabilité et l'efficacité opérationnelle.

Les températures haute et basse affectent des caractéristiques physiques et chimiques des ergols combustibles.

Ces évolutions de caractéristiques peuvent dégrader le fonctionnement des propulseurs des armes guidées,

L'échauffement aérodynamique produit rapidement d'importants gradients de température et de contraintes thermiques (comparable à celles d'un choc thermique) dans la structure de l'aéronef.

L'application rapide d'une contrainte thermique peut fragiliser des matériaux et causer des défaillances importantes à des niveaux de contrainte plus faibles que pour une évolution moins rapide vers la même température. Bien que les matériaux fragiles soient plus susceptibles, les matériaux ductiles peuvent fatiguer sous un cyclage répété.

Le choc thermique peut induire des effets dynamiques en modifiant la rigidité de torsion et de flexion et peut modifier les caractéristiques aérodynamiques des éléments de guidage.

2.2.5.2 Humidité

Les états humides induits par la chaleur (résultant de la combinaison d'une ventilation insuffisante et de l'aspiration de l'humidité à l'intérieur des compartiments internes de l'avion) accélèrent la dégradation des matériaux, et causent davantage de défauts de fonctionnement des systèmes que la seule exposition à l'ambiante.

La réduction ou la perte de la résistance d'isolement des circuits et des composants peut avoir comme conséquence la dégradation des performances, une fiabilité réduite, ou la défaillance totale des systèmes électriques et électroniques.

La performance des matériels de surveillance peut être réduite par le brouillard et l'accumulation de l'humidité dans les systèmes optiques,

Les atmosphères chaudes et humides dans des secteurs non aérés fournissent des conditions idéales pour la croissance fongique et aggravent l'attaque par les agents corrosifs. Les effets de l'humidité sur le matériel, la réalisation de boîtiers étanches dans la durée ; les techniques pour les rendre hermétiques, les mesures contre la pénétration de vapeur d'eau, les procédures de séchage et l'indication des niveaux d'humidité sont examinées.

Les niveaux bas induits d'humidité peuvent influencer les caractéristiques de composants électriques et électroniques et affecter le calibrage, la stabilité et l'exactitude des systèmes électroniques.

2.2.5.3 Pression atmosphérique

2.2.5.3.1 Différences de pression

En vol en altitude la basse pression atmosphérique et ses variations pendant les changements d'altitude peuvent créer un différentiel de pression. Notamment à travers les parois des boîtiers et des dispositifs de protection du matériel et des composants.

Ainsi les composants peuvent se déformer, avoir des défaillances structurales ou interférer avec les pièces internes voisines, entraînant un mauvais fonctionnement.

Même lorsque le matériel est conçu pour égaliser les pressions, les vitesses de variation de pression pendant les évolutions en vol peuvent dépasser les valeurs admissibles.

Le matériel qui se base sur la densité de l'atmosphère environnante pour maintenir une température de fonctionnement acceptable, peut montrer une performance dégradée ou devenir non fiable par la réduction de l'efficacité du système de refroidissement à cause de l'altitude.

2.2.5.3.2 Conditionnement d'air

Un matériel qui dissipe et qui compte sur la convection pour maintenir une température de fonctionnement acceptable peut présenter une performance dégradée par la réduction de l'efficacité du système de refroidissement à cause de l'altitude.

2.2.5.4 Glace

2.2.5.4.1 Généralités

L'accumulation de givre ou de glace provenant de la condensation de la vapeur d'eau déclenchée par des variations de température et de pression peut avoir comme conséquence des performances dégradées ou la défaillance totale du matériel dans des secteurs particuliers ou dans des volumes sans conditionnement d'air.

2.2.5.4.2 Spécifique au transport maritime

Au cours des manœuvres du bâtiment naval, de la glace peut se former sur un matériel situé sur le pont principal. Cette glace sera semblable à celle présente dans les conditions normales. Les commandes, les mécanismes de déclenchement et les systèmes de mise en action des armements peuvent être détériorés ou complètement bloqués du fait des interférences causées par la carapace de glace. Le givrage et la formation de glace sur les sondes et les circuits optiques peuvent réduire les performances des systèmes de surveillance et de navigation.

2.2.5.5 Sable et poussière

Les effets de l'exposition à la poussière et aux atmosphères chargées de sable induisent :
Des performances altérées pour les systèmes optiques par accumulations de substances particulières.

La corrosion des matériaux sous-jacents exposés.

Le colmatage des ouvertures.

L'efficacité réduite des systèmes de refroidissement et de ventilation.

Le dépôt à l'intérieur du matériel de couches de poussière pouvant causer le court-circuit des isolateurs, le cheminement et l'accumulation de l'électricité statique, l'interférence entre les pièces mobiles et la contamination des systèmes de lubrification.

2.2.5.6 Erosion par impact de vitesse élevée

Pendant le vol, l'impact avec la grêle, la pluie, la poussière et le sable peuvent réduire la sensibilité des systèmes de navigation et de surveillance en érodant les radômes et les dispositifs de capots protecteurs.

Une réduction significative de la qualité optique des pare-brise d'avions a été rapportée après des vols de bas niveau aux vitesses de 290 à 320 m/s au-dessus des secteurs de désert. Un marquage et l'éraflure des finitions extérieures peuvent faciliter la corrosion des matériaux.

L'impact de la pluie, la grêle et de la poussière peuvent avoir comme conséquence l'accumulation de charges électrostatiques et causer une défaillance de fonctionnement ou une défaillance des composants sensibles des systèmes électroniques.

2.2.5.7 Immersion, précipitation et jet

Le matériel soumis à l'immersion, la précipitation ou au jet est susceptible de subir des voies d'eau, (tous contaminants contenus y compris), par des ouvertures ou par l'infiltration des matériaux, et des joints, affectant l'intégrité structurale des boîtiers et la performance opérationnelle de

l'équipement semblable, à ce qui a été décrit dans les **paragraphes 2.1.1.6 et 2.2.2.6 Immersion, précipitation et jet.**

2.2.5.8 Atmosphères acides

Les conditions opérationnelles sur les aérodromes en activité sont susceptibles de conduire à une atmosphère contaminée par les gaz d'échappement des groupes de servitude pour avions, l'équipement de soutien au sol et les véhicules de services opérant sur le site.

Les matériels installés à l'extérieur des avions équipés de l'inversion de poussée ou à l'arrière d'un avion à turbopropulseurs sont susceptibles d'être contaminés par le jet des moteurs à réaction.

Les matériels peuvent aussi être installés sur des aéronefs provenant d'aérodromes où l'atmosphère est polluée par les émissions et les retombées de sites industriels proches. Alternativement, la contamination provenant de ces sites peut se traduire par des pluies acides, ou après évaporation de l'humidité sous la forme d'un brouillard acide.

Pendant les sorties en vol, les matériels peuvent subir des pluies acides ou de la brume.

Les équipements installés dans des compartiments contenant des piles au plomb ou thermiques peuvent être affectés par la teneur en acide des émissions dégagées quand de tels dispositifs sont activés pendant les points fixes au sol et les sorties en vol.

Les conditions climatiques actuelles et les suivantes aggraveront les effets des dépôts acides sur les matériels de la même manière que les retombées des atmosphères salines décrites dans le **sous-paragraphes 6.2.2.**

Les sévérités des atmosphères acides résultant de la pollution industrielle et des niveaux enregistrés de contamination sont données par la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-01.**

Les niveaux de contamination pour une application particulière sont mieux déterminés à partir d'une évaluation de la probabilité et de la fréquence du déploiement dans les régions exposées à de telles conditions; de préférence qu'à partir d'une expérience antérieure pour laquelle le matériel a été soumis à ce type d'environnement.

L'information concernant la concentration de l'acide mesurée en eau de pluie au Royaume-Uni est fournie dans la **référence 12 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 7-01 Annex B.**

Un guide sommaire comparant les périodes d'exposition à une brume acide d'une concentration spécifiée aux niveaux mesurés des pluies acides dans le Royaume-Uni et de l'atmosphère près des échappements de véhicule est donné dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 3 Issue 4 Chapter 4-03.**

Les effets préjudiciables potentiels sur le matériel de l'exposition aux atmosphères et aux dépôts acides sont semblables à ceux énumérés dans le **sous-paragraphes 6.2.3. de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 7-01.**

Les informations supplémentaires sont fournies dans la référence 13 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 7-01 Annex B et dans la norme DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-02.

2.2.5.9 Contamination par les Fluides (voilure fixe)

Le matériel déployé sur des avions peut, occasionnellement, être temporairement contaminé par divers fluides et composants utilisés en opération, en entretien ou en maintenance de la plate-forme de vol ou d'un autre matériel de l'avion.

La contamination peut provenir : d'éclaboussement accidentel ou de débordement, de la fuite des joints, de ruptures ou intentionnellement, par exemple lors de nettoyage, de dégivrage, de décontamination à la suite d'une attaque chimique ou biologique, ou par l'utilisation d'extincteurs.

La sévérité de l'attaque des contaminants par les fluides dépendra de la température du contaminant et du matériel contaminé, séparément ou ensemble suite à la contamination.

Les températures peuvent s'étendre des conditions ambiantes locales (incluant l'influence du soleil) aux températures opérationnelles élevées du matériel déployé et de la contamination par le fluide.

Des exemples de fluides et de composés par lesquels le matériel peut être contaminé sur les avions à voilure fixe sont donnés ci-dessous :

- Carburants
- Huiles
 - o Lubrifiant

- o Hydraulique
- o Huile de ricin base
- o Ester de phosphate base
- o Pétrole base
- Graisses
 - o Lubrifiant
 - o Protecteur
- Couple/fluides de transmission
- Fluïde de silicone
- Antigél
- Fluides de dégivrage
 - o Avions
 - o Piste
- Dissolvants et liquides de nettoyage
- Matériaux d'étanchéité de carlingue
- Extincteurs
- Décontaminants nucléaires (NBC), biologiques et chimiques

Dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 7-01 Annex B** la **référence 14** donne des caractéristiques des carburants, des lubrifiants et d'autres matières employés dans le fonctionnement et l'entretien des avions et des véhicules de servitude associés. La **référence 15** donne des informations sur les décontaminants chimiques et biologiques.

Les effets typiques de la contamination par des fluides sont :

- L'attaque chimique des matériaux tels que les caoutchoucs, les plastiques, les produits d'étanchéité et les adhésifs ayant pour résultat le gonflement, le rétrécissement, la fissuration, la décoloration, la fuite des substances du contenu et le défaut des joints collés,
- le changement des propriétés matérielles,
- le changement dimensionnel des éléments,
- le boursoufflement et la dissolution des revêtements de protection et des finitions de surface,
- l'altération et effacement des étiquettes d'identification, des procédures et des notices d'avertissement de risque,
- la corrosion.
- le lessivage des antioxydants,
- la réduction des résistances d'isolation électrique.

2.2.5.10 Moisissures (voilure fixe)

Les matériels peuvent être infectés par des spores de moisissure quand les capots de protections, les panneaux d'accès à la plate-forme de vol, et les différentes parties des matériels sont enlevés pour l'entretien. Une fois les matériels infectés, les spores se nourrissent des matériaux employés dans la fabrication de l'équipement, des produits employés pour l'entretien et des excréments, comme, par exemple, la transpiration des mains du personnel au cours de manipulations

Bien que les conditions optimales pour la croissance des moisissures se trouvent dans les régions tropicales, il est établi que les spores peuvent se développer dans les régions tempérées ou froides du monde. Selon l'espèce, les spores de moisissures peuvent croître à des températures allant de 5 ° C à 50 ° C. Elles peuvent aussi survivre à des températures extrêmes. Une fois que les spores sont présentes, les conditions appropriées pour leur croissance peuvent être créées artificiellement, par exemple si l'équipement est placé dans le véhicule à un endroit où ils stagnent ou dans une ambiance mal ventilée de compartiments d'avions susceptibles d'augmenter la moisissure.

D'une façon similaire des microclimats peuvent être créés dans les zones infectées du matériel. Ouvrir les trappes d'inspection et enlever les couvercles régulièrement pendant les inspections des équipements et des parties de matériel assure un apport d'oxygène maintenant la croissance des spores.

Une description plus détaillée du cycle de vie des spores de moisissure et les conditions pour favoriser la croissance est donnée dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-01**. Beaucoup de matériaux non métalliques employés dans la construction des matériels renferment des composés qui constituent une source de nutriments pour les champignons, dont l'extraction peut conduire à une moindre efficacité des revêtements de protection de surface, et à une baisse des propriétés mécaniques des adhésifs.

Les enzymes sécrétées convertissent les aliments en une forme soluble et les déchets corrosifs produits peuvent attaquer le substrat sur lequel poussent des champignons. Ce qui provoque l'encrassement et la corrosion des finitions de surface et le ternissement des transparents.

Les champignons retiennent l'humidité et ralentissent le processus de séchage, ce qui est de nature à introduire d'indésirables chemins conducteurs d'électricité et à diminuer la résistance d'isolement.

Des informations supplémentaires sur les matériaux qui sont sensibles et qui sont résistants aux spores de moisissure, et aux processus de dégradation des champignons et autres effets, sont contenus dans les **références 16 et 17 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 7-01 Annex B** et la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-01**.

L'essai de développement des moisissures est normalement à réaliser pour vérifier que les matériaux et les composants appropriés ont été employés dans la fabrication du matériel. Les atmosphères chaudes, humides, stagnantes favorisent la croissance des moisissures. Dans le cas où l'équipement passe seulement une petite proportion de sa durée de vie dans ces conditions et où le choix rigoureux des matériaux et des composants a été fait et où les bonnes pratiques de construction ont été utilisées, l'essai de développement des moisissures est probablement inutile.

D'autres informations sur l'applicabilité de l'essai de croissance des moisissures sont fournies dans la **référence 17 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 7-01 Annex B**.

2.2.5.11 Contamination par les fluides (voilure tournante)

Le matériel déployé sur des hélicoptères peut, occasionnellement, être temporairement contaminé par divers fluides et composants utilisés en opération, en entretien ou en maintenance de la plate-forme de vol ou d'un autre matériel de l'hélicoptère.

La contamination peut provenir : d'éclaboussement accidentel ou de débordement, de la fuite des joints, de ruptures ou intentionnellement, par exemple lors de nettoyage, de dégivrage, de décontamination à la suite d'une attaque chimique ou biologique, ou par l'utilisation d'extincteurs.

La gravité de l'attaque des fluides contaminants dépendra de la durée de l'exposition et la température du contaminant et du matériel contaminé, soit au moment ou après que la contamination se sera produite. Les températures peuvent provenir des conditions locales ambiantes (y compris l'influence du rayonnement solaire) ou de températures de fonctionnement élevées du matériel contaminé et ou du liquide contaminant. La contamination par les types suivants de liquide et de composés peut survenir à un moment quelconque durant son affectation sur l'appareil:

- Carburants
- Huiles
 - o Lubrifiant
 - o Hydraulique
 - o Huile de ricin base
 - o Ester de phosphate base
 - o Pétrole base
- Graisses
 - o Lubrifiant
 - o Protecteur
- Couple/fluides de transmission
- Fluide de silicone
- Antigél
- Fluides de dégivrage
 - o Avions

- o Piste
- Dissolvants et liquides de nettoyage
- Matériaux d'étanchéité de carlingue
- Extincteurs
- Décontaminants nucléaires (NBC), biologiques et chimiques

Dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 8-01 Annex A** la **référence 7** donne les caractéristiques des carburants, des lubrifiants et autres matières employés dans le fonctionnement et l'entretien des avions et des véhicules de servitude associés. La **référence 8** fournit de l'information sur les décontaminants chimiques et biologiques.

Les effets typiques de la contamination par des fluides sont :

- Attaque chimique des matériaux tels que les caoutchoucs, les plastiques, les produits d'étanchéité et adhésifs traduit par un gonflement, un rétrécissement, une fissuration, une décoloration, des fuites et des défaillances des joints collés
- Changements des propriétés matérielles.
- Changements dimensionnels des éléments.
- Boursoufflage et dissolution des revêtements de protection et des finitions de surface.
- Altération/effacement des étiquettes d'identification, des procédures et des notices d'avertissement de risque.
- Corrosion.

2.2.5.12 Moisissures (voilure tournante)

Les matériels peuvent être contaminés par des spores de moisissure à tout moment. La contamination peut arriver pendant la maintenance de routine lorsque les panneaux d'accès sont enlevés. Une fois les matériels infectés, les spores se nourrissent des matériaux employés dans la fabrication de l'équipement, des produits employés pour l'entretien et des excréments, comme, par exemple, la transpiration des mains du personnel au cours de manipulations.

Bien que les conditions optimales pour la croissance des moisissures se trouvent dans les régions tropicales, il est établi que les spores peuvent se développer dans les régions tempérées ou froides du monde. Selon l'espèce, les spores de moisissures peuvent croître à des températures allant de 5 ° C à 50 ° C. Elles peuvent aussi survivre à des températures extrêmes. Une fois que les spores sont présentes, les conditions appropriées pour la croissance peuvent être créées artificiellement, par exemple si l'équipement est placé dans le véhicule à un endroit où il stagne ou dans une ambiance mal ventilée de compartiments d'hélicoptère susceptible d'augmenter la moisissure comme décrit dans **DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 9-02**

D'une façon similaire des microclimats peuvent être créés dans les zones infectées du matériel. Ouvrir les trappes d'inspection et enlever les couvercles régulièrement pendant les inspections des équipements et des parties de matériel assure un apport d'oxygène maintenant la croissance des spores.

Une description plus détaillée du cycle de vie des spores de moisissure et les conditions pour favoriser la croissance est donnée dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-01**.

Beaucoup de matériaux non métalliques employés dans la construction des matériels renferment des composés qui constituent une source de nutriments pour les champignons, dont l'extraction peut conduire à une moindre efficacité des revêtements de protection de surface, et à une baisse des propriétés mécaniques des adhésifs.

Les enzymes sécrétées convertissent les aliments en une forme soluble et les déchets corrosifs produits peuvent attaquer le substrat sur lequel poussent des champignons provoquant l'encrassement et la corrosion des finitions de surface et le ternissement des transparents.

Les champignons retiennent l'humidité et ralentissent le processus de séchage, ce qui est de nature à introduire d'indésirables chemins conducteurs d'électricité et à diminuer la résistance d'isolement

Des informations supplémentaires sur les matériaux qui sont sensibles et qui sont résistants aux spores de moisissure, et aux processus de dégradation des champignons et autres effets, sont contenues dans les **références 9 et 10 de l'annexe A** et dans la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-02**.

L'essai de développement des moisissures est normalement à réaliser pour vérifier que les matériaux et les composants appropriés ont été employés dans la fabrication du matériel. Les atmosphères chaudes, humides, stagnantes favorisent la croissance des moisissures. Dans le cas où l'équipement passe seulement une petite proportion de sa durée de vie dans ces conditions et où le choix rigoureux des matériaux et des composants a été fait et où les bonnes pratiques de construction ont été utilisées, l'essai de développement des moisissures est probablement inutile.

D'autres information sur l'applicabilité de l'essai de croissance des moisissures sont fournies dans la **référence 10 de DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Chapter 8-01 Annex A**.

2.3 Systèmes spécifiques

2.3.1 Equipements portables ou portatifs

2.3.1.1 Température

2.3.1.1.1 Haute température

Les exemples des effets directs d'une forte température sont :

- une résistance réduite et une plus grande élasticité des matériaux entraînant une surcharge,
- des changements dimensionnels et une dilatation thermique différentielle d'éléments structuraux et mécaniques causant :
 - o une déformation et une défaillance des composants structuraux,
 - o un blocage des pièces mobiles,
 - o une défaillance des joints collés,
- des changements des caractéristiques des systèmes de protection contre les chocs et les vibrations, réduisant la protection contre les environnements mécaniques,
- des changements dimensionnels et des déformations permanentes, réduisant l'efficacité des garnitures et des joints,
- une efficacité réduite des systèmes de refroidissement, en particulier ceux qui dépendent de la convection et du rayonnement à l'atmosphère environnante, ayant pour résultat :
 - o des changements des caractéristiques électriques des matériaux employés dans la fabrication de composants électriques et électroniques,
 - o des défauts dans les connexions internes des composants électroniques,
 - o un fonctionnement dégradé ou une défaillance des systèmes électriques et électroniques,
- un abaissement de la viscosité et une efficacité réduite des lubrifiants,
- une décoloration et un fendillement des finitions protectrices,
- une plus grande vitesse de combustion des explosifs et des propulseurs,
- un dégazage de composés par les matériaux plastiques.

2.3.1.1.2 Basse température

Des exemples des effets d'une basse température sont :

- une fragilisation et une élasticité réduite des matériaux (particulièrement les matériaux non métalliques), réduisant la résistance aux chocs mécaniques,
- des changements dimensionnels et une contraction thermique différentielle causant :
 - o une déformation et une défaillance des composants structuraux,
 - o un collage des systèmes mécaniques,
 - o une défaillance des joints de brasure,
- des changements des caractéristiques des systèmes de protection contre les chocs et les vibrations,

- une performance réduite des batteries.
- des changements des caractéristiques des matériaux employés dans la fabrication des composants électroniques :
 - o une défaillance des joints mécaniques et des supports des composants électroniques.
 - o une performance dégradée ou une défaillance totale de systèmes électriques et électroniques,
- une plus grande viscosité des lubrifiants réduisant la performance des systèmes mécaniques,
- un abaissement des vitesses de combustion des propulseurs et explosifs.

2.3.1.1.3 Variation rapide de température

Des exemples des effets et des défaillances résultant de la variation température rapide sont :

- une dilatation et une contraction rapides des matériaux ayant pour résultat la déformation et la défaillance des composants structuraux,
- une défaillance des joints de brasure,
- un fendillement des finitions protectrices

2.3.1.2 Humidité

La **référence 1** de la norme **DEF STAN 00-35 Part 6 Issue 4 Annex A** fournit de l'information sur la protection du matériel contre les effets des atmosphères chargées en humidité. Les effets sur le matériel, la réalisation et le maintien de boîtiers étanches, les méthodes pour rendre hermétique, les barrières à la pénétration de vapeur d'eau et les procédures de séchage y sont discutés.

2.3.1.2.1 Humidité élevée

Les exemples des effets d'une humidité élevée sont :

- Une absorption de l'humidité par des matériaux non métalliques causant :
 - o Un gonflement et une réduction de la résistance mécanique,
 - o Un poids accru,
 - o Un changement des caractéristiques thermiques et électriques,
- Une absorption et adsorption de l'humidité réduisant la résistance d'isolement et produisant des lignes de fuite dans les circuits électriques et électroniques,
- Une performance dégradée et une défaillance du système électrique/électronique et de composants dus aux points précédents,
- Une corrosion galvanique des parties métalliques et des composants, en particulier dans les zones de contrainte élevée et où des finitions protectrices ont été endommagées,
- Un blocage des pièces mobiles et une contamination des lubrifiants par des produits de corrosion,
- La création des microclimats dans des secteurs (souvent confinés) où l'humidité est enfermée,
- Une accélération de l'attaque chimique et biologique.

Des niveaux très bas d'hygrométrie peuvent avoir comme conséquence une accumulation d'électricité statique causant un amorçage et la défaillance de composants électroniques basse tension.

Certains matériaux absorbant l'humidité peuvent par ailleurs être sujets à des contractions dimensionnelles et un affaiblissement des propriétés mécaniques suite à un assèchement trop prononcé (cas des matériaux cellulosiques par exemple).

2.3.1.3 Pression

Les dispositifs sensibles à la pression conçus pour détecter et répondre à de petits changements de pression peuvent subir des dommages permanents, pendant le transport, dans les soutes des avions de transport. Les parois des récipients scellés ou partiellement scellés, avec une fuite qui évolue

plus lentement que les variations de pression, peuvent être soumises à une déformation provisoire ou permanente, qui peut interférer avec les composants internes.

2.3.1.4 Sable et poussière

Les exemples des effets des atmosphères chargées en poussières et sable sont :

- Un colmatage des ouvertures d'où une efficacité réduite de la ventilation et des systèmes de refroidissement,
- Des rayures et un marquage des optiques, des panneaux transparents et de la finition des surfaces causant :
 - o Une corrosion des matériaux en sous-couche qui deviennent exposés,
 - o Une performance altérée des systèmes optiques,
 - o Une obstruction ou un blocage des dispositifs mécaniques.
- Une contamination des systèmes électriques/électroniques avec :
 - o La création de fuite de courant,
 - o La contamination des surfaces de contact,
 - o Une fiabilité réduite,
 - o Des systèmes de lubrification souillés.

2.3.1.5 Immersion, précipitation et aspersion

Le matériel soumis à l'immersion est exposé à une entrée d'eau (y compris les contaminants contenus) causant l'infiltration et le gonflement des matériaux et induisant des défaillances semblables à celles liées à la condensation et aux niveaux élevés d'humidité.

2.3.1.6 Atmosphères acides

Parmi les effets sur les matériels de leur exposition à des atmosphères salines et/ou acides, on peut citer :

- La corrosion des métaux par des processus électrochimiques,
- Le cloquage des revêtements protecteurs par électrolyse,
- La formation de dépôts conducteurs entraînant des dysfonctionnements sur les systèmes électriques ou électroniques,
- Le faïencage et la fissuration des plastiques et élastomères,
- La réduction des propriétés en traction, la fragilisation et la perte de propriétés électriques des matériaux non métalliques,
- La décoloration et la perte de transparence,
- L'attaque chimique des optiques

Des défauts variés peuvent être induits par l'interaction des processus de corrosion et des facteurs liés à la configuration des systèmes, tels que par exemple :

La proximité de métaux différents qui facilite la corrosion galvanique,

La combinaison de la corrosion aux contraintes mécaniques : processus de corrosion par fatigue, phénomènes de fretting,...

La fragilisation des aciers résistants (fragilisation par l'hydrogène).

Les mécanismes et les facteurs qui influencent les vitesses de corrosion, l'effet des vapeurs organiques, et la dégradation des matériaux non métalliques sont décrits plus en détail dans le document « **QSTAG 362 Chemical Environmental Contaminants affecting the Design of Military Materiel** », ainsi qu'au **chapitre 8-02, partie 4 du document DEF STAN 0035**. Il convient de faire appel à un spécialiste dans les cas particuliers.

2.3.1.7 Contamination par les fluides

Parmi les effets sur les matériels d'une contamination par des fluides, on peut citer :

- L'attaque chimique de certains matériaux tels que les caoutchoucs, les matériaux plastiques, les matériaux d'étanchéité, les adhésifs.

- Les modifications dimensionnelles de ces mêmes matériaux,
- La dégradation, la dissolution de revêtements protecteurs,
- L'effacement, le masquage de marquages d'identification, de modes opératoires ou d'étiquettes de mise en garde,
- La corrosion,
- Le lessivage d'antioxydants

2.3.1.8 Moisissures

Beaucoup de matériaux non métalliques renferment des composés qui constituent une source de nutriments pour les champignons, dont l'extraction peut conduire à une moindre efficacité des revêtements de protection de surface, et à une baisse des propriétés mécaniques.

Les enzymes secrétées pour convertir les nutriments en composés assimilables et les composés corrosifs dégagés par les moisissures sur leur substrat de croissance, peuvent provoquer des salissures et des attaques par corrosion, des dégradations de surface des optiques ou autres surfaces transparentes.

Les moisissures retiennent l'humidité et ralentissent les processus de séchage, ce qui contribue à diminuer les résistances d'isolement et créer des chemins conducteurs d'électricité sur les équipements électriques.

Des données complémentaires sur les matériaux sensibles ou résistants à la croissance et l'attaque des moisissures, champignons ou bactéries sont consultables dans les documents :

- **QSTAG 361 Fungal Contamination Affecting the Design of Military Materiel**
- **BS 2011 Part 2.1J (IEC 60068 -2-10) Test J and Guidance; Mould Growth. Appendix F**

Ainsi que sur la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 11-02**.

Parmi les effets d'attaques bactériennes, on peut citer :

- La décoloration des matériaux et des revêtements.
- Une diminution de la résistance d'isolement électrique.
- La corrosion des métaux ferreux et, dans une moins grande mesure, des matériaux non ferreux.
- La dégradation des huiles dérivées du pétrole (huiles isolantes ou autres)

2.3.1.9 Faune

Les matériaux utilisés pour la fabrication de matériels sont susceptibles d'être dégradés directement par les animaux notamment s'ils constituent une nourriture potentielle ou s'ils servent à protéger des aliments, ou indirectement par attaque chimique ou biologique à partir des excréments animales. Les dégâts occasionnés sur des emballages ou des enveloppes protectrices peuvent favoriser des pénétrations d'humidité, d'agents chimiques ou infectieux (moisissures ou bactéries). Les câbles ou conduits rongés par des animaux peuvent constituer des sources potentiellement dangereuses pour les personnels, ou conduire à des défaillances opérationnelles.

Des informations plus détaillées sur l'attaque des matériels par les insectes et les rongeurs, en particulier lors des déploiements en zone tropicale, sont données au *chapitre 11-01, partie 4 du document DEF STAN 0035*.

2.3.2 Systèmes d'armes

2.3.2.1 Les températures hautes et basses

Les effets des températures hautes et basses induits par des munitions sur le dispositif de lancement jusqu'à la séparation sont traités dans la section appropriée de cet **AECTP** (c.-à-d., pour le déploiement sur véhicule de terrain, bâtiment naval de surface, sous-marin, aéronef à ailes fixes ou à voilure tournante).

Les variations rapides de température subies par des munitions une fois soumises à l'échauffement aérodynamique et pendant le transfert rapide de l'air vers l'eau sont susceptibles d'induire des taux

élevés de contrainte thermique dans les structures, les systèmes et les composants. Bien que les niveaux d'effort résultants puissent être identiques, le gradient de température élevé peut fragiliser certains matériaux et causer une défaillance pour un niveau de contrainte beaucoup plus bas qu'avec une application plus progressive de la température.

2.3.2.2 Humidité

Pour les armes guidées et les projectiles à grande vitesse, tous les effets nocifs attribuables à l'humidité devraient apparaître pendant le stockage, le transport ou le déploiement sur le porteur de lancement plutôt qu'en raison du traitement reçu pendant l'étape finale comparativement très brève. Les températures élevées générées, lors du tir, devraient plutôt réduire les niveaux d'hygrométrie relative dans les sections et les compartiments du matériel.

Tandis que le même raisonnement peut être admis pour s'appliquer aux torpilles, les changements d'hygrométrie peuvent être néfastes au déploiement d'autres types d'armes sous-marines, particulièrement pour les compartiments qui ne sont pas chargés en gaz inerte.

Dans le cas des mines qui sont susceptibles de rester dans un état stable pendant des périodes comparativement longues jusqu'à être approchées et activées par la cible, une augmentation de l'hygrométrie, en raison du déploiement, peut causer la réduction de la résistance d'isolation des circuits qui peut dégrader la fiabilité, induire l'auto-allumage ou causer un non fonctionnement.

2.3.2.3 Pression atmosphérique

Puisque la quantité de chaleur perdue dans l'atmosphère par convection est proportionnelle à la densité d'air environnante, l'efficacité de refroidissement en altitude sera réduite par rapport à celle obtenue au niveau du sol. La température de fonctionnement des systèmes et des composants thermogènes pendant le vol peut s'élever au-dessus de celle nécessaire pour la performance optimale. Une densité faible d'air favorise également l'étincelle de rupture entre les conducteurs électriques, l'arc entre composants électriques et électroniques et la décharge de corona dans les secteurs avec des champs électriques forts (par exemple, autour des antennes) causant des interférences électromagnétiques.

Les vitesses rapides de montée et de descente des armes guidées et des projectiles peuvent causer des différences de pression à travers les parois des boîtiers partiellement scellés et des compartiments des différents équipements et des composants, conduisant à des déformations et à des interférences mécaniques ou électriques. Cela se traduira par une dégradation des performances ou une défaillance de fonctionnement. La décompression provoquant une variation rapide de pression peut présenter un risque pour les matériels totalement scellés.

La migration des composés employés pour améliorer la transmission de la chaleur et le fonctionnement des composants qui reposent sur les propriétés de circulation de l'air peuvent causer une dégradation de performance et une défaillance.

2.3.2.4 Pression dynamique

La pression dynamique de l'air est un facteur significatif déterminant la sévérité de la vibration induite provoquée par l'écoulement turbulent autour des armes guidées et des projectiles.

2.3.2.5 Pression hydrostatique

La pression hydrostatique impose des charges mécaniques à la structure et à l'enveloppe extérieure des armes sous-marines. Cette pression peut causer la déformation des joints. Toute entrée d'eau peut avoir comme conséquence le défaut de fonctionnement des dispositifs d'armement et de détection compromettant le fonctionnement fiable des munitions.

2.3.2.6 Glace

L'impact avec la glace des armes en emport sous avion, des rails de lancement, des supports d'arme, des pylônes et de l'interface du porteur/arme peut causer l'interférence ou le colmatage total des

tringleries et des mécanismes de déclenchement et présenter un risque sérieux en termes de sûreté de vol des avions et de vulnérabilité lors du combat.

Le type de givrage peut induire des charges dynamiques, empêcher une séparation correcte, altérer l'aérodynamique de l'arme et du porteur ou interférer, après séparation, avec le déploiement des éléments de guidage aérodynamique de l'arme.

Des problèmes semblables sont susceptibles de se produire lors du lancement depuis les porteurs ouverts des navires de surface fonctionnant en conditions de basse température. Particulièrement dans cas où l'arme, sur le lanceur, est non protégée et où la mise à feu implique l'ouverture d'un carter métallique éventuellement couvert de glace.

Le givrage et les accumulations de glace sur des radômes, des parties optiques d'infrarouge, du laser ou de l'autodirecteur peuvent réduire la performance des systèmes d'orientation ou rendre la mise à feu de l'arme impossible.

2.3.2.7 Impact de la grêle, de la pluie, de la poussière et du sable

L'abrasion, la déformation, l'érosion et la piqure de corrosion des surfaces externes des radômes et des circuits optiques des têtes chercheuses des armes guidées provoquées par l'impact à vitesse élevée avec la grêle, la pluie, la poussière et le sable peuvent réduire la sensibilité et la performance du système d'orientation, voir la rupture par les gouttes d'eau de parties du radôme sensibles à l'impact.

Le décollement ou la rupture de fibre peut se produire dans les panneaux de composites. Une accumulation de charges électrostatiques sur les surfaces en contact avec l'extérieur peut causer le défaut de fonctionnement ou la défaillance des systèmes sensibles comme les composants de basse tension et compromettre la fiabilité des dispositifs d'armement, des systèmes de mise à feu et de l'ogive.

2.3.2.8 Agents chimiques et biologiques

Dans le cas des munitions qui ont des temps de vol courts et qui se mettent à feu immédiatement lorsqu'elles atteignent leur cible, telles que les armes guidées, les projectiles et les bombes, les effets des agents chimiques et biologiques lors des phases de lancement et de vol libre seront insignifiants (durée de vol trop court au regard du processus d'oxydation).

Cependant certains gaz, vapeur ou fluide peuvent être « auto-générés » lors du vol du missile. Ces agents peuvent alors être de nature particulièrement corrosive. Une fois combinés à la température, les temps de vol peuvent alors être suffisamment longs pour que de tels agents aient des effets sur les matériaux composant le système et soient la cause de problèmes de fonctionnement en vol.

2.3.2.9 Dépôts salins et acide

- Exemples des effets sur les matériaux d'une exposition à de l'acide et aux environnements salins :
- Corrosions des métaux par actions électrochimiques,
- Boursoufflements des revêtements de protection,
- Formations des dépôts conducteurs causant des défauts de fonctionnement de composants électriques et de cartes électroniques,
- Fissuration des plastiques et des caoutchoucs,
- Décoloration et perte de transparence,
- Fragilisation et perte de propriétés électriques des matériaux non métalliques,
- Grippage des pièces mobiles,

Les défauts résultent de l'interaction entre les agents générant de la corrosion et les caractéristiques des matériaux, par exemple proximité des métaux différents (corrosion bimétallique électrochimique ou corrosion galvanique), combinaison sollicitations mécaniques et corrosives (fatigue par corrosion, corrosion par fretting), fragilisation des aciers à haute limite élastique (fragilisation par l'hydrogène). Davantage d'informations sur ces derniers points sont données en

Référence 2 paragraphe 6.1 References de la norme **DEF STAN 00-35 Part 4 Issue 4 Chapter 8-02**. Le recours à des experts sur ces sujets peut s'avérer très utile.

2.3.2.10 Contamination par les fluides

Exemples d'effets typiques de contamination par les fluides :

- Attaque chimique des matériaux tels que les caoutchoucs, les plastiques, les mastics et les adhésifs ayant pour résultat le gonflement, le rétrécissement, la fissuration, la décoloration, la fuite des joints
- Evolutions de dimension,
- Boursoufflage et dissolution des revêtements de protection de surface et des finitions.
- Défiguration/Effacement de l'étiquetage pouvant générer des risques en matière de sécurité.
- Altération des antioxydants, des plastifiants, des mastics.
- Réduction de la résistance d'isolation.

2.3.2.11 Moisissures

Beaucoup de matériaux non métalliques contiennent les éléments qui constituent un substrat favorable au développement des moisissures ; éléments dont l'altération peut causer une réduction de résistance mécanique et altérer les propriétés protectrices des finitions extérieures. Les enzymes convertissent la matière consommée en substances solubles ou déchets qui eux-mêmes ont un pouvoir corrosif. Les moisissures maintiennent l'humidité et peuvent donc provoquer des défauts électriques non souhaités. Plus d'informations sur les matériaux susceptibles, les matériaux résistants aux moisissures et sur le processus de dégradation mis en jeu par les moisissures sont données dans *les références de l'Annexe B de la DEF STAN 00-35 part 6*.

2.3.2.12 Rongeurs :

Les boîtiers en plastique, isolations des câbles et autres finitions protectrices extérieures peuvent être physiquement endommagés par des rongeurs. Les dépôts ou excréments des rongeurs peuvent sensibiliser les matériels en les rendant vulnérables aux effets de l'humidité, des insectes, des moisissures, des bactéries et de la corrosion.

Les rongeurs peuvent transpercer les gaines des câbles électriques ainsi que l'armature protectrice des mines maritimes tandis que les bactéries résultant de l'action des organismes polluants sont susceptibles de générer de la corrosion.

3 INTERACTION ENTRE AGENTS D'ENVIRONNEMENT CLIMATIQUES

3.1 Généralités sur les différentes combinaisons et leurs effets

Le tableau 16 de type croisé donne les différentes combinaisons envisageables entre deux paramètres climatiques différents.

Vent	Vent							
Température	X	Température						
Soleil	X	X	Soleil					
Pluie	X	X	X	Pluie				
Humidité	X	X			Humidité			
Neige	X	X	X	X		Neige		
Brouillard		X					Brouillard	
Grêle	X							grêle

Tableau 16 : Combinaisons possibles de 2 paramètres climatiques

A l'exception du brouillard qui en général se produit en atmosphère calme, le vent est souvent associé aux autres paramètres climatiques. Les effets associés à ces derniers peuvent en être modifiés, éventuellement de nouveaux effets sont susceptibles de survenir.

La température est également l'un des plus importants paramètres climatiques qui peut avoir une influence sur les effets des autres paramètres. Ceci est évident pour la pluie ou le brouillard à température négative ainsi que pour l'humidité relative. Pour la grêle, puisque principalement les effets mécaniques sont considérés pour ce paramètre, la température ambiante ne joue pratiquement aucun rôle.

Le tableau 16 montre également des combinaisons possibles entre soleil et pluie, soleil et neige, neige et pluie. Ces combinaisons ne doivent pas être appréhendées de manière concomitante mais successive. Après une averse par exemple et sous l'influence de la température de l'air et du sol, une augmentation sensible du taux d'humidité de l'air ambiant peut être observée et conduire à des dysfonctionnements de certains dispositifs. Les mécanismes de dégivrage de structures verglacées peuvent être modifiés par les effets du rayonnement solaire (fusion de la glace à l'interface glace/structure). Le soleil interagit également sur les mécanismes de fonte ou de sublimation de la neige. Une averse de pluie sur un manteau neigeux conduit également à une augmentation sensible des charges de neige sur les structures par le biais du piégeage de l'eau par le manteau neigeux.

Les deux tableaux 17 et 18 donnent les effets induits par le vent et la température sur les autres paramètres climatiques.

Paramètres combinés	Effets combinés
Vent/température	Augmentation des coefficients d'échange Effets mécaniques du vent ajoutés aux : dilatations et déformation des matériaux coincements par le biais des dilatations différentielles Modification des sensations de confort humain
Vent/soleil	Modification des effets thermiques (enveloppe et température interne) par l'augmentation des coefficients d'échange et diminution des températures de surface
Vent/pluie	Augmentation des défauts d'étanchéité par l'augmentation du différentiel de pression air entre les faces au vent et sous le vent Diminution de la visibilité (atmosphérique, vitrages ou systèmes optiques) Modification du comportement aéroélastique de certaines structure par le jeu du ruissellement (ex : haubans de pont)
Vent/humidité	Augmentation des phénomènes d'évaporation superficielle (nappes d'eau, peau ...) Modification des effets induit par l'humidité
Vent/neige	Transport de neige par le vent (blizzard) et formation de congère Charges de neige dissymétriques sur les structures (côtés au vent et sous le vent) Pénétration de neige (grilles de ventilation, toiture, ...)
Vent/grêle	Augmentation des dommages sur les structures verticales (murs, vitrages ...) par modification de l'angle d'impact et de la vitesse terminale des grêlons

Tableau 17 : Effets induits par le vent sur les autres paramètres physiques

<i>Paramètres combinés</i>	<i>Effets induits</i>
Température/soleil	Augmentation des températures de surface Chambrage Augmentation des effets de la température
Température/pluie	Pour $T < 0^{\circ}\text{C}$: pluie verglaçante Charges de glace sur les structures Blocage des parties mobiles Réduction de la visibilité à travers les vitrages et les systèmes optiques Surfaces glissantes Pour $T > 0^{\circ}\text{C}$ Augmentation de la corrosion
Température/neige	Différentes qualités de la neige (sèche, humide) Cycles de fonte et regel Glissement de manteaux neigeux Etanchéité
Température/humidité	Pour des températures et humidités relative élevées : Inconfort humain Augmentation des réactions chimiques et biologiques (corrosion, moisissures, ...) Pour les températures et humidités faibles, apparition de décharges électrostatiques
Température/brouillard	En-dessous de 0°C : brouillard givrant Réduction de la visibilité Surfaces glissantes

Tableau 18 : Effets induits par la température sur les autres paramètres climatiques

3.2 Événements climatiques

3.2.1 Définitions

Dans la nature, les paramètres climatiques évoluent ensemble, les uns avec et par rapport aux autres. Les événements climatiques sont donc souvent une combinaison de comportement/d'évolution des paramètres météorologiques. Ces événements sont souvent caractérisés par leur fréquence d'occurrence, leur intensité ainsi que par leur durée. Un exemple est présenté à la figure 15

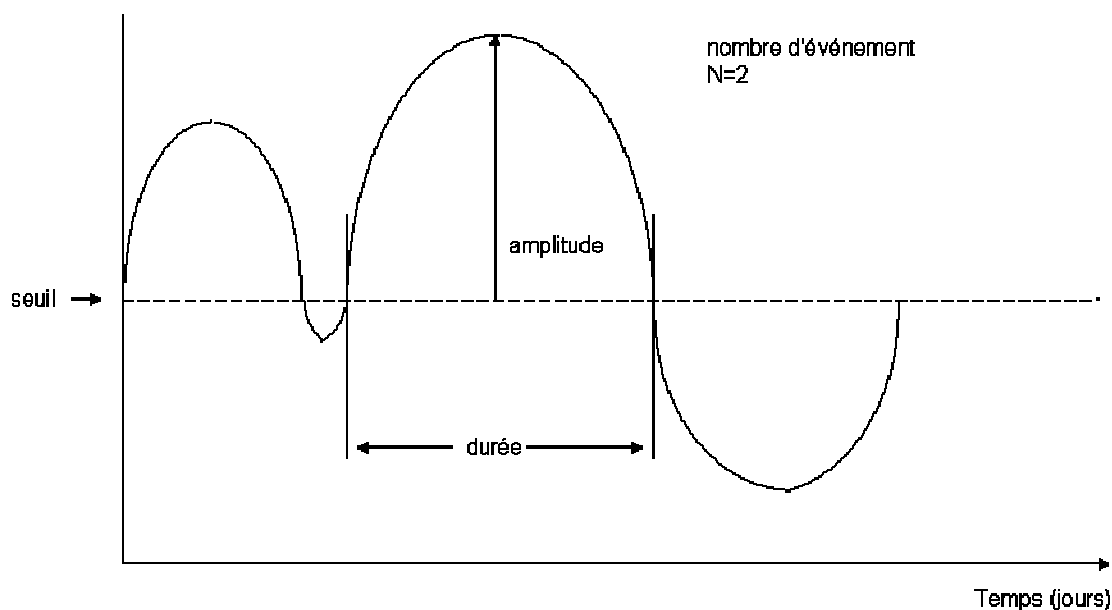


Figure 15 : Intensité d'un événement climatique en fonction du temps

Dans cet exemple, un seuil a été choisi. A partir de là, il est facile de définir que la fréquence d'occurrence est de 2, l'intensité est définie par la valeur maximale au-dessus du seuil (l'amplitude) et la durée est exprimée en nombre de jours pendant lesquels la valeur est au-dessus du seuil.

La simultanéité de 2 paramètres climatiques peut avoir des effets non négligeables comme décrit dans les tableaux ci-dessus. Pour calculer ces effets, des méthodes d'analyse peuvent être mises au point. La méthode des index décrivant des conditions climatiques est donnée en exemple ci-dessous.

3.2.2 Méthode d'analyse

Il s'agit de connaître la probabilité d'occurrence de la valeur maximale de différents index au cours d'une période donnée. Ces index peuvent être construits à partir de 2 données climatiques X et Y. Par exemple, il est possible de définir quatre conditions climatiques différentes à l'aide des index X, XY, XY² et XY³. Les événements ayant une période de retour de 1 an à plusieurs dizaines d'années (50 ans généralement) peuvent être déterminés pour les conditions climatiques suivantes :

Test 4 = condition A : faible Y / fort X

Test 3 = condition B : Y et X modérés

Test 2 = condition C : fort Y / faible X

Test 1 = condition D : pas de Y / X très fort

La méthode statistique des valeurs extrêmes peut être appliquée à des événements indépendants (méthode des renouvellements). Le nombre d'événements est n et x est la plus forte valeur observée au cours de chaque événement. La probabilité pour que l'index maximal x ne dépasse pas la valeur X au cours de l'ensemble des événements est donnée par la fonction de répartition F(X) :

$$F(X) = \text{Prob} [x \leq X] = i / n + 1$$

où i est l'indice de classement des valeurs X par ordre croissant.

En admettant que les valeurs maximales des index observées au cours de 2 événements consécutifs ou non soient indépendants, et que la variabilité du nombre d'événements par an soit faible, la probabilité $F_a(X)$ de non-dépassement de la valeur X en une année est égale au produit des probabilités de non-dépassement F(X) au cours de chacun des r événements de l'année ($r = n/N$ avec N : nombre d'année) :

$$F_a(X) = [F(X)]^r$$

Inversement, la probabilité de dépassement de X au cours d'une année s'exprime par :

$P = 1 - F_a(X)$. A ceci est associé la période de retour T qui est égale à la valeur moyenne de la période séparant 2 dépassements de X ; T s'exprime en année et est donné par :

$$T = \frac{1}{1 - F_a(X)}$$

Par exemple si $i = 34$, $n = 50$ et $N = 34$. Ceci donne une période de retour en année de :

$$T = \frac{1}{1 - \left(\frac{34}{50+1}\right)^{50/34}} = \frac{1}{1 - 0.55} = 2.22$$

La fonction de répartition $F(X)$ de l'index maximal annuel est ajustée par une loi de distribution particulière dite des valeurs extrêmes. La loi de Gumbel utilisée a pour expression :

$$F(X) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{X-a}{b}\right)\right]$$

où a est un paramètre de position et b un paramètre d'échelle proportionnel à l'écart-type de la distribution. Pour obtenir un bon ajustement, les paramètres a et b sont calculés par la méthode des moindres carrés. En définissant une variable réduite Y telle que :

$$Y = -\text{Ln}[-\text{Ln}(F(X))]$$

$$Y = \frac{X-b}{a}$$

la relation donnant la fonction de répartition s'écrit et est représentée par une droite dans le système d'axes (X, Y) .

Considérons l'échantillon constitué des n valeurs les plus fortes de l'index, classé en ordre croissant :

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_i \leq \dots \leq X_{n-1} \leq X_n$$

A la valeur X_i correspond la fréquence observée de non-dépassement $F_i = \frac{i}{n+1}$ ainsi que la variable réduite

$$Y_i = -\text{Ln}[-\text{Ln}(F_i(X))]$$

Le problème se ramène donc à celui de l'ajustement d'une droite (X, Y) sur l'ensemble des points (X_i, Y_i) qui est effectué par une méthode des moindres carrés.

L'estimation de la valeur des index pour une période de retour T exprimée en année est alors immédiate :

$$Y = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)^{1/r}\right)$$

$$X_i = aY + b \quad \text{avec}$$

Dans un premier temps, il s'agit de calculer les index XY , XY , XY^3 puis de classer ces index en ordre croissant. Ensuite il faut pour

Test A : faible Y / fort X → prendre la valeur max de X et lire la valeur de Y correspondante

Test B : Y et X modérés → prendre la valeur max de XY donc le couple (X, Y) est extrait

Test C : fort Y / faible X → prendre la valeur max de Y et lire la valeur de X correspondante

Test D : pas de Y / X très fort → analyse par une analyse par la méthode des renouvellements.

3.2.3 Exemple de la combinaison pluie/vent

L'étude de la concomitance pluie-vent (ou pluie battante) porte sur la probabilité d'occurrence simultanée de la pluie et d'un vent fort. C'est donc la statistique du maximum annuel de la vitesse de vent par temps de pluie, statistique à partir de laquelle il sera possible de déterminer les événements de période de retour proche d'une dizaine d'années. La détermination qualitative des caractéristiques

pluviométriques se fait à l'aide de 3 classes de précipitation définies à partir des codes de "temps présent" :

- Classe A : tout type de temps, avec ou sans précipitation
- Classe B : bruines et pluies faibles, modérées et fortes
- Classe C : bruines et pluies modérées et fortes

La pluie battante

La pluie devient battante lorsque les gouttes, déviées de leur trajectoire verticale par le vent sont chassées contre la façade d'un bâtiment; ce phénomène climatique est influencé par l'ensemble des

caractéristiques propre à chacun des deux facteurs vent et pluie. L'intensité I_{hi} de ce phénomène, lié à la direction de vent donnée i , représente la quantité d'eau reçue par une surface verticale donnée dans un temps donné. Quand la surface donnée est immatérielle, la pluie battante est

qualifiée de pluie battante libre. Elle est reliée à l'intensité I_v des précipitations reçues par une surface horizontale et à la vitesse du vent V_i par la relation :

$$I_{hi} = I_v \cdot \frac{V_i}{V_p}$$

où V_p est la vitesse verticale moyenne des gouttes de pluie.

3.3 Influence sur le corps humain des agents d'environnement

3.3.1 Introduction

La notion de sollicitation bioclimatique en espace extérieur et semi extérieur diffère de celle qui prévaut en espace intérieur : les conditions sont contrôlables en espace intérieur, tandis qu'en espace extérieur ou semi extérieur ces conditions sont soit modifiables, soit non contrôlables. En conséquence les attentes de l'individu par rapport à l'ambiance extérieure se situent dans une gamme plus étendue que celles de l'ambiance thermique et aéraulique intérieure.

3.3.2 Les paramètres climatiques

Les quatre principaux critères décrivant l'ambiance thermique et aéraulique sont:

- La vitesse du vent,
- Le rayonnement,
- La température d'air,
- L'humidité relative.

Les effets de ces différents paramètres climatiques peuvent sur les individus est de deux sortes :

- L'effet mécanique qui est l'effet direct de la force du vent exercée sur les individus et sur les objets comme les parapluies, les papiers ou la poussière etc. L'effet mécanique de la vitesse de vent et les forces correspondantes sont décrits par l'échelle de Beaufort (cf. tableau suivant).
- L'effet thermique est l'effet indirect du vent ayant un impact sur le confort thermique quand il est combiné avec la température de l'air, l'humidité relative et le rayonnement solaire (cf. chapitre suivant).

L'effet mécanique

Le tableau 19 présente l'échelle de Beaufort.

Vitesse du vent en m/s		Caractéristiques du vent
Force	z = 2m	
2	1.5 - 3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent.
3	3 - 4.5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux. Les cheveux sont dérangés. Les vêtements amples battent au vent.
4	4.5 - 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	7 - 9	Les petits arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	9 - 11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	11 - 14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14 - 17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pédestre très difficile et dangereuse.
9*	17-20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

Tableau 19 : Echelle de Beaufort [Gandemer et Guyot, 1976].

La limite de gêne mécanique est de 3.6 m/s, soit 3 m/s de vitesse moyenne et son écart-type de 20%. Selon l'échelle Beaufort cette valeur est associée aux premiers événements d'inconfort : "Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent. Les cheveux sont dérangés." [Gandemer et Guyot, 1976].

"La notion de confort est à dissocier de celle de sécurité : le seuil de danger qui correspond à la force qui tend à jeter à terre un être humain est entièrement basé sur des considérations mécaniques et aérodynamiques (maître couple, poids, position etc.) et correspond en général à des vitesses moyennes de l'ordre de 15 m/s." [Gandemer et Guyot, 1976], soit 22.5 m/s en vitesse de point (facteur de pointe de 1.5, cf. paragraphe 1.9).

3.3.3 Combinatoire des paramètres climatiques, les effets thermiques

La sensation thermique peut être liée au changement de température corporelle de l'individu dû aux échanges thermiques entre l'individu et son environnement. De nombreux facteurs affectent les flux de chaleur depuis le corps, et par conséquent le confort thermique. Ces facteurs peuvent être regroupés en trois catégories [Auliciems et Szokolay, 1997] :

Facteurs climatiques	température d'air, rayonnement, humidité relative, mouvement d'air;
Facteurs personnels	métabolisme, vêtue;
Facteurs contributeurs	alimentation, boisson, acclimatation, forme corporelle, gras sous-cutané, âge, sexe.

Tableau 20 : Facteurs influençant le confort thermique [Auliciems et Szokolay, 1997]

Afin de décrire l'implication des différents facteurs climatiques, une carte bioclimatique peut être construite. Cette carte a pour vocation de partitionner notre espace climatique afin de construire ce

que l'on peut nommer comme la "zone de confort" pour les ambiances extérieures. La figure 16 permet d'illustrer ce concept. Sur ce graphique, l'échelle des abscisses représente la température du bulbe sec (ou Dry Bulb Temperature, DBT) qui mesure la température de l'air.

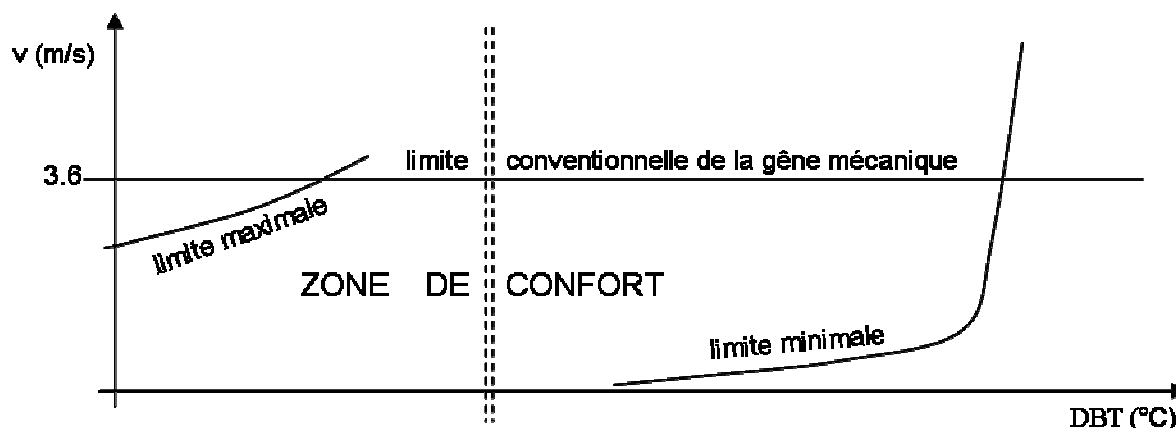


Figure 16 : Zone de confort

Conception de la zone de confort

Nous pouvons alors définir deux limites:

- o La limite maximale (cf. figure précédente) correspond à la vitesse admissible pour les températures basses -inférieures à ~10°C – d'après la conception du nouvel indice de refroidissement éolien (new Wind Chill Index, [Bluestein et al., 1999].).
- o La limite minimale (cf. figure précédente) indique la vitesse de l'air nécessaire au maintien du confort thermique pour les températures hautes – supérieures à ~26°C. La limite maximale a été déterminée à partir la charte bioclimatique révisée par Arens et al. [Arens et al., 1986]. Au delà de cette limite, l'implication de l'humidité relative devient prépondérante.

Les limites de zone de confort aérothermique sont ajustables : quand du rayonnement est présent ou lorsque l'humidité relative varie, les limites se déplacent. L'effet modificateur du rayonnement est exprimé par le champ effectif de rayonnement (Effective Radiant Field, ERF). Le ERF décrit le flux rayonnant additionnel de grande longueur d'onde reçu par le corps quand la température des surfaces environnantes diffère de celle de l'air. La température des surfaces environnantes peut être exprimée comme la Température Radiante Moyenne (MRT). Le ERF du corps humain est liée à la

Température Radiante Moyenne : $ERF = f_{eff} \cdot h_r (MRT - T_a)$

où

f_{eff} est la fraction de surface du corps humain exposée au rayonnement ambiant (en m²);

h_r est le coefficient d'échange par rayonnement (en W/ m²K);

T_a est la température ambiante (en °K).

La figure 17 montre qu'en présence de températures importantes et de rayonnement additionnel, la limite minimale de la zone est décalée vers les températures moins importantes. Cela signifie, que pour contrebalancer l'effet conjugué du rayonnement et des températures élevées une vitesse du vent plus importante est nécessaire. De même, le rayonnement compense des températures basses, en conséquence la limite maximale se déplace vers les valeurs moins importantes de température en présence du rayonnement.

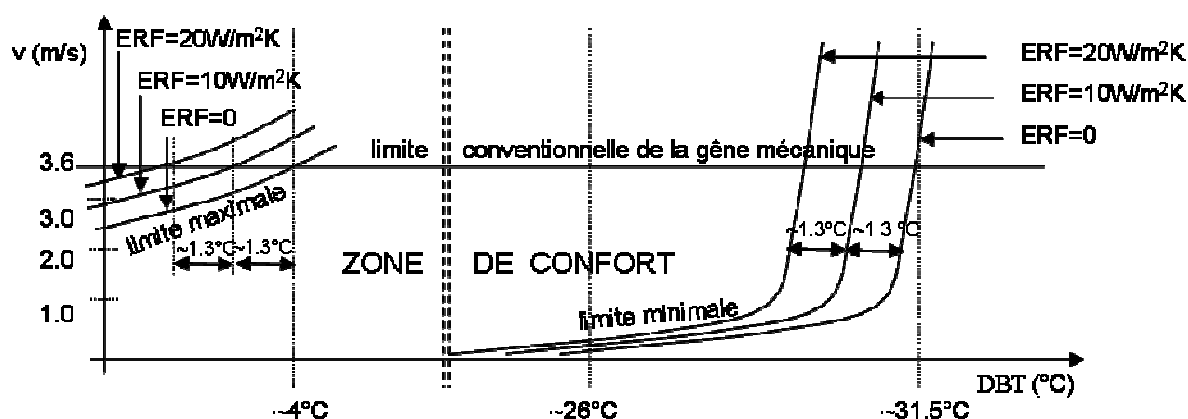


Figure 17 : Zone de confort en fonction de la vitesse du vent, de la température et du rayonnement solaire

Limites ajustables de la zone de confort [Szűcs 2005]

L'augmentation de l'humidité relative a un effet identique à celui de l'augmentation du rayonnement (ERF) (en ambiance chaude). Une humidité relative importante restreint la perte thermique de l'individu par évaporation, à moins qu'une vitesse d'air suffisamment importante ne maintienne l'évaporation [Auliciems et Szokolay, 1997]. De plus, une vitesse d'air plus importante favorise la dissipation de la chaleur de l'individu par convection pourvu que la température de l'air ne dépasse pas la température du "noyau central" de l'individu qui vaut environ 37°C.

La carte bioclimatique montre qu'environ 10 W/m² de ERF compense une différence de température de ~1.3 K. En conséquence, la présence du rayonnement additionnel induit le déplacement des limites de la zone de confort aérothermique (Figure 18).

Une augmentation de taux d'humidité relative de 10% suscite une augmentation d'environ 0.6 K dans la température ressentie dans l'intervalle de 50% à 90% de l'humidité relative. Cela signifie que par rapport à l'humidité relative de 50%, l'effet d'une augmentation de 30% de cette dernière est équivalent à une augmentation de température d'environ 1.8 K.

Afin de pouvoir évaluer le confort aérothermique, il est aussi nécessaire d'évaluer l'habillement de l'individu (facteur d'isolation thermique vestimentaire, I_{clo}). Toutefois, un niveau d'habillement peut être associé à chaque saison; et les variations climatiques journalières suscitent des modifications journalières également de l'habillement. Les individus ont la possibilité d'enlever ou de compléter leur habillement par des vêtements au cours de la journée ou au cours des événements et selon le contexte. Par exemple:

- o pour une situation estivale, un I_{clo} de 0.3 nous permet de percevoir comme confortable une ambiance présentant une DBT de 27 °C et une vitesse d'air de 0.5 m/s.
- o Pour une situation hivernalen un I_{clo} de 3.2 nous permet de percevoir comme confortable une ambiance présentant une DBT de 8°C et une vitesse d'air de 0.5 m/s.

Le tableau 21 présente plusieurs tenues vestimentaires et les isolations thermiques associées.

Tenue vestimentaire	I_{clo} (unité Clo)	R_{clo} (en m ² .K.W ⁻¹)
Collant	0.01	1.5
Chaussettes : fines	0.03	4.6
épaisses	0.1	15.5
Sous-vêtements : slip	0.03	4.6
t-shirt	0.09	13.9
Chemises : manches courtes	0.15	23.25
flanelle, manches longues	0.3	46.5
Pantalons : léger	0.2	31
flanelle	0.28	43.4

Jupes : légère	0.2	31
d'hiver, manches longues	0.4	62
Tricots : léger	0.2	31
Epais	0.35	54.2
Veste	0.35	54.2
Chaussures (semelles épaisses)	0.04	6.2

Tableau 21 : Valeur d'isolation thermique pour des pièces vestimentaires types, quelques exemples extraits de [ISO 7730 1994].

La zone de confort, et les risques de s'en éloigner.

Afin de qualifier complètement notre espace climatique, les zones de confort ou d'inconfort aérothermique peuvent être distinguées selon les sous-catégories suivantes:

- o Inconfort dû uniquement à l'effet mécanique (ou dynamique) du vent : la vitesse du vent dépasse le seuil de 3.6 m/s (zone A sur la figure suivante);
- o Inconfort dû à l'effet dynamique du vent et à une température basse sans dépasser le seuil "dynamique" de 3.6 m/s (zone B sur la figure suivante);
- o Inconfort simultané dû à l'effet dynamique du vent et à une température basse : la vitesse du vent dépasse le seuil de 3.6 m/s (zone C sur la figure suivante);
- o Inconfort thermique dû à une température élevée et à l'absence de mouvement d'air satisfaisant (zone D sur figure suivante);
- o Inconfort simultané dû à l'effet dynamique du vent et à une température élevée : la vitesse du vent dépasse le seuil mécanique de 3.6 m/s, mais son effet refroidissant est insuffisante au maintien de confort thermique. Au-delà d'environ 37°C de température de bulbe sec, le mouvement de l'air augmente la perte de chaleur par évaporation. Cependant il augmente le gain thermique dû à la convection. Le flux thermique reçu par l'individu est plus important, que celui perdu par évaporation, ce qui suscite de l'inconfort aérothermique. (zone E sur la figure suivante).

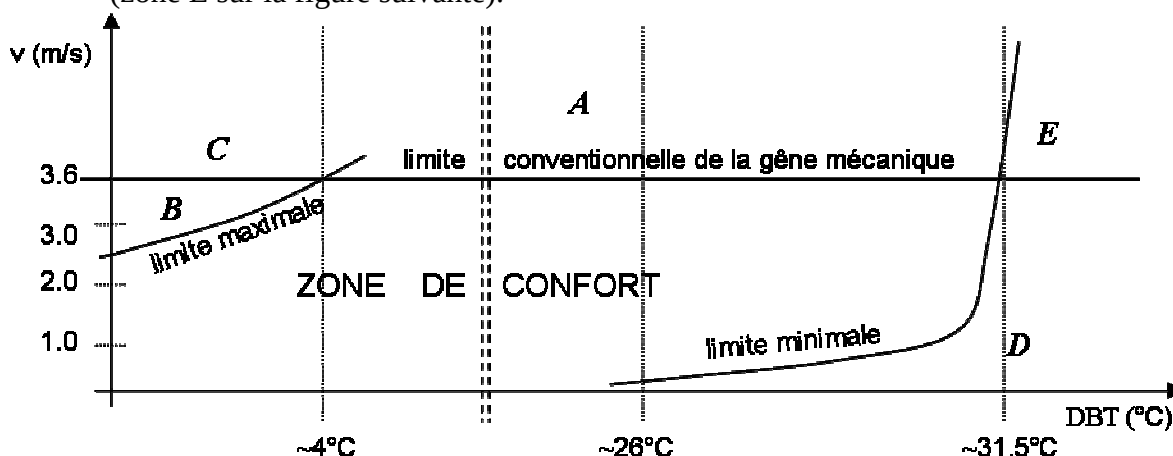


Figure 18 : Zone de confort aérothermique intégrée, joutée par différentes zones d'inconfort aérothermiques marquées par A, B, C, D et E.

D'un point de vue sécuritaire:

- les zones B et C peuvent être décrites suivant l'indicateur Wind Chill Index. Le tableau 22 présente les valeurs de température perçue en fonction de la vitesse d'air et de la température d'air. Chaque zone de couleur correspond à un temps de séjours dans l'environnement hostile avant que des gelures apparaissent

Température d'air (°C)																
Vitesse m/s	-30	-28	-26	-24	-22	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0
2	-37	-35	-33	-30	-28	-26	-23	-21	-19	-16	-14	-12	-9	-7	-5	-2
3	-40	-37	-35	-32	-30	-28	-25	-23	-20	-18	-16	-13	-11	-8	-6	-4
4	-41	-39	-36	-34	-31	-29	-26	-24	-22	-19	-17	-14	-12	-9	-7	-4
5	-42	-40	-37	-35	-32	-30	-27	-25	-22	-20	-17	-15	-12	-10	-7	-5
6	-44	-41	-38	-36	-33	-31	-28	-26	-23	-21	-18	-16	-13	-11	-8	-5
7	-45	-42	-39	-37	-34	-32	-29	-27	-24	-21	-19	-16	-14	-11	-9	-6
8	-45	-43	-40	-38	-35	-32	-30	-27	-25	-22	-19	-17	-14	-12	-9	-6
9	-46	-43	-41	-38	-36	-33	-30	-28	-25	-22	-20	-17	-15	-12	-9	-7
10	-47	-44	-42	-39	-36	-34	-31	-28	-26	-23	-20	-18	-15	-12	-10	-7
20	-52	-49	-46	-43	-40	-38	-35	-32	-29	-26	-23	-21	-18	-15	-12	-9
22	-52	-50	-47	-44	-41	-38	-35	-32	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-13	-10
24	-53	-50	-47	-44	-42	-39	-36	-33	-30	-27	-24	-22	-19	-16	-13	-10
26	-54	-51	-48	-45	-42	-39	-36	-33	-31	-28	-25	-22	-19	-16	-13	-10
28	-54	-51	-48	-45	-43	-40	-37	-34	-31	-28	-25	-22	-19	-16	-14	-11
30	-55	-52	-49	-46	-43	-40	-37	-34	-31	-28	-26	-23	-20	-17	-14	-11

Tableau 22 : Table de la température ressentie issue du Wind Chill Index,

Zone rouge : temps de séjours à 5 minutes maximum avant engelures, zone orange : temps de séjours 10 minutes maximum, zone jaune : 30 minutes de séjours maximum.

- les zones E et D peuvent être décrites suivant l'index de stress thermique. Le tableau suivant présente les valeurs de température perçue en fonction de la vitesse d'air et de la température d'air. Chaque zone de couleur correspond à un temps de séjours dans l'environnement hostile avant que des gelures apparaissent

Température d'air (°C)												
Humidité relative %	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
50	25	25	26	27	28	31	34	38	43	48	55	
55	25	25	26	27	29	32	36	40	46	52	58	
60	24	24	25	27	29	33	37	42	48	55	63	
65	24	24	25	27	30	34	39	44	51	58	67	
70	23	23	25	27	31	35	41	47	54	63	72	
75	22	23	24	27	31	36	42	49	58	67	77	
80	21	22	24	28	32	38	44	52	61	71	83	
85	20	21	24	28	33	39	47	55	65	76	88	
90	18	21	23	28	34	41	49	58	69	81	94	
95	17	19	23	28	34	42	52	62	73	87	101	

Tableau 23 : Table de la température ressentie issue du Heat Stress Index,

Les zones du tableau 23 correspondent :

- Zones bleu : Aucun problème,
- Zones verte : Fatigue possible avec une exposition prolongée et une activité physique,
- Zone jaune : Insolation, crampes thermiques, épuisement possible avec une exposition prolongée et une activité physique,

- Zone orange : Insolation, crampes thermiques, épuisement, situation dangereuse, choc thermique possible avec une exposition prolongée et une activité physique,
- Zone rouge, choc Thermique, situation extrêmement dangereuse.

Figures

Figure 1 : Diagramme du point triple	5
Figure 2 : Equivalence des pressions et des altitudes	9
Figure 3 : Schéma de la dispersion du rayonnement.....	11
Figure 4 : Diagramme des effets de l'humidité.....	21
Figure 5 : Modes de transport des particules au sol sous l'action du vent selon leur taille (modifié d'après Pye, 1987).....	23
Figure 6 : Formation des précipitations.....	27
Figure 7 : Exemples de différentes formes de grêlons en fonction de leur grosseur ([15], d'après Carte and Kidder, 1970)	28
Figure 8 : Modélisation du vent.....	34
Figure 9 : Distribution du vecteur vent moyen	35
Figure 10 : Principaux types de précipitations : convectives, orographiques et frontales	38
Figure 11 : Courbes intensité-durée-fréquence (IDF)	40
Figure 12 : Formes de glace selon CEI 60721-2-2	51
Figure 13 : Rayon limite d'un cylindre sur lequel peu ou très peu de glace se formera (Source : CEI 60721-2-2).....	51
Figure 14 : Masse volumique en fonction de la température et pour trois concentrations.....	56
Figure 15 : Intensité d'un événement climatique en fonction du temps	97
Figure 16 : Zone de confort	101
Figure 17 : Zone de confort en fonction de la vitesse du vent, de la température et du rayonnement solaire.....	102
Figure 18 : Zone de confort aérothermique intégrée, joutée par différentes zones d'inconfort aérothermiques marquées par A, B, C, D et E.....	103

Tableaux

Tableau 1 : Points fixes de définition de l'EIT90	5
Tableau 2 : Répartition de la puissance pour M0, M1 et M2	10
Tableau 3 : Tableau des énergies	13
Tableau 4 : Classification des grêlons et vitesse terminale de chute moyenne	27
Tableau 5 : Distribution de la taille des grêlons, d'après DEF STAN 00-35 (Part 4)/3, chapitre 7-01	29
Tableau 6 : Echelle de Beaufort, échelle des forces du vent	33
Tableau 7 : Valeurs α et β de la formule de Montana pour la France	39
Tableau 8 : Sévérités d'essai de pluie forfaitaires.....	42
Tableau 9 : Valeurs de pression d'impact	43
Tableau 10 : Définition des degrés de protection.....	46
Tableau 11 : Catégories des principaux types de cristaux	48
Tableau 12 : Densité de l'eau en fonction de la température.....	55
Tableau 13 : Densité de la solution saline en fonction de la température	55
Tableau 14 : Domaine de concentration des principaux polluants gazeux de l'air	58
Tableau 15 : sources de contaminants gazeux à l'intérieur de locaux.....	59
Tableau 16 : Combinaisons possibles de 2 paramètres climatiques	94
Tableau 17 : Effets induits par le vent sur les autres paramètres physiques.....	95
Tableau 18 : Effets induits par la température sur les autres paramètres climatiques.....	96
Tableau 19 : Echelle de Beaufort [Gandemer et Guyot, 1976].....	100
Tableau 20 : Facteurs influençant le confort thermique [Auliciems et Szokolay, 1997]	100
Tableau 21 : Valeur d'isolation thermique pour des pièces vestimentaires types, quelques exemples extraits de [ISO 7730 1994].....	103
Tableau 22 : Table de la température ressentie issue du Wind Chill Index,	104
Tableau 23 : Table de la température ressentie issue du Heat Stress Index,	104

Bibliographie

- [1] - Alfaro, S.C., M.V. Lopez, M. Sabre and L. Gomes, 1997, Implications of a sandblasting model for dust production by wind erosion in arid areas, in Wind Erosion: An International Symposium, Commemorating the 50th anniversary of the USDA's wind erosion research at Kansas State University, 3-5 June 1997, Manhattan, Kansas, USA, 10pp.
- [2] - Alfaro, S., 2008, Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion, *Geomorphology*, 93, 157-167.
- [3] - Alghamdi, A.A.A. and M. Akyurt, 2001, On sandstorms and energy recovery from sandstorms, *Energy Conv. Manag.*, 42, 1143-1156.
- [4] - Andreotti, B., P. Claudin, and S. Douady, 2002, Selection of dune shapes and velocities – Part 1: Dynamics of sand, wind and barchans, *Eur. Phys. J. B.*, 28, 321-339.
- [5] - Bagnol, R.A., 1941, *The physics of blown sand and desert dunes*, Methuen, New York, 265pp.
- [6] - Callot, Y., B. Marticorena and G. Bergametti, 2000, Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara desert, *Geodinamica Acta*, 13, 245-270.
- [7] - Gilette, D.A., D.W. Fryrear, T. Ley, T. Cahill, T. Gill and E. Gearhart, 1995, Ratio of vertical flux of PM10 to total horizontal mass flux of airborne particles in wind erosion, *Air & Waste Management Association*, 95-TA38.02, 1-16.
- [8] - Gomes, L. G. Bergametti, G. Coudé-Gaussen and P. Rognon, 1990, Submicron desert dust: a sandblasting process, *J. Geophys. Res.*, 95, 927-925.
- [9] - Goudie, A.S. and N.J. Middleton, 2001, Saharan dust storms: nature and consequences, *Earth-Science Rev.*, 56, 179-204.
- [10] - Marticorena, B. and G. Bergametti, 1995, Modelling the atmospheric dust cycle: 1-design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, 100, 16415-16430.
- [11] - Sabre, M., M.V. Lopez, S.C. Alfaro, J.L. Rajot and L. Gomes, 1997, Characterization of the fine dust particules production process by wind erosion for two types of bare soil surfaces, in Wind Erosion: An International Symposium, Commemorating the 50th anniversary of the USDA's wind erosion research at Kansas State University, 3-5 June 1997, Manhattan, Kansas, USA, 11pp.
- [12] - Sauermann, G., P. Rognon, A. Poliakov and H.J. Herrmann, 2000, The shape of the barchan dunes of Southern Morocco, *Geomorphology*, 36, 47-62.
- [13] - Wang, H.T., Y.H. Zhou, Z.B. Dong and M. Ayrault, 2008, Vertical dispersion of dust particles in a turbulent boundary layer, *Earth Surf. Process. Landforms*, 33, 1210-1221.
- [14] - MEZEIX J.F, WALDVOGEL A. , VENTO D. LA RECHERCHE n°175, mars 1986, p 300 310
- [15] - GOKHALE N.R, Hailstorms and hailstone growth. State University of New-York Press. Albany, 1975
- [16] - GENEVE R, La grêle. Mémorial de la météorologie nationale n°48, 1961
- [17] - DEF-STAN 00635, part 4-1, chapitre 7-01 et 7-02
- [18] - TRAITE PHYSIQUE DU BATIMENT. Editions CSTB
- [19] - Arya, S.P., 1988, *"Introduction to micrometeorology"*, *Int. Geophysics Series*, vol 42, 308pp.
- [20] - Cadiou H., 1996 *"La mesure du vent : sa perturbation par les obstacles"* Note Technique n°33, CETIM.
- [21] - CSTB, 1995, *"Traité physique du Bâtiment – Connaissances de base"*, Tome 1, 832pp.

- [22] - DEF-STAN 00-35 (Part 4) / Issue 1, 28 novembre 1986.
- [23] - Estienne P. et A. Godard, 1970, "Climatologie", Ed. Armand Colin, 368pp.
- [24] - Arens E., Gonzalez R., and Berglund L (1986) Thermal Comfort under an Extended Range of Environmental Conditions. ASHRAE Transactions, Vol. 92, part 1, pp. 18-26.
- [25] - Auliciems A., Szokolay S. V. (1997) Thermal comfort PLEA (Passive and Low energy Architecture) Notes, PLEA et Department of Architecture The University of Queensland Brisbane 4072; ISBN 0 86776 729 4.
- [26] - Bluestein M., Zecher J. (1999) A New Approach to an Accurate Wind Chill Factor, Bulletin of the American Meteorological Society.
- [27] - Gandemer J., Guyot A. (1981) La protection contre le vent. Aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques; Cahier du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- [28] - NF EN ISO 7730, "Ambiance Thermique, Détermination des Indices PMV et PPD et Spécifications des Modifications de Confort Thermique", norme européen et française, ISSN 0335-3931, décembre 1995.
- [29] - Szücs Á. (2005) Caractérisation des ambiances des stades modernes du point de vue du confort aérothermique des spectateurs, Contribution à l'approche multicritères aérothermique, visuelle et acoustique; le 19 décembre 2005, thèse de doctorat de l'université de la Rochelle.