

CHAPITRE 3

LES MÉTHODES DE DÉGLAÇAGE ET LES MATÉRIAUX ÉLECTROACTIFS

[Mycours.com](https://www.mycours.com)

3. LES MÉTHODES DE DÉGLAÇAGE ET LES MATÉRIAUX ÉLECTROACTIFS

3.1 INTRODUCTION

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'inventaire et à la présentation d'une nouvelle classification des différentes méthodes de déglacement actives et passives disponibles. Les méthodes seront classées selon le type de transfert de l'énergie de déglacement : directement à la glace ou via le substrat glacé. Cette nouvelle distinction de l'apport énergétique mettra en contexte les travaux de cette thèse où le déglacement s'effectue par déformation du substrat. La deuxième partie est consacrée à une introduction aux principaux systèmes/matériaux actifs où ils sont décrits et leurs performances comparées. Pour finir, le potentiel des systèmes/matériaux électroactif appliqué au déglacement est présenté par une brève revue littéraire des cas existants.

3.2 LES MÉTHODES DE DÉGLAÇAGE

Une étude approfondie sur les techniques antigivrantes et dégivrantes a été réalisée en 1994 (révisée en 2002 pour le *Canadian Electricity Association Consortium* par Laflamme, Laforte et Allaire, 2002) afin d'outiller les ingénieurs qui ont à faire face à ce type de problèmes. Sur la base de cette étude, les techniques répertoriées peuvent être classées en trois grandes catégories selon le niveau d'énergie qu'elles requièrent. Les deux premières sont actives et comprennent les méthodes thermiques où la glace est fondue en partie ou totalement et les méthodes mécaniques brisant la glace. La troisième catégorie englobe les méthodes passives utilisant l'énergie et les forces naturelles tels la gravité, le vent, la radiation solaire ou la tension de

surface. Elles comprennent entre autres les revêtements de surface solides à faible adhérence à la glace et les dispositifs favorisant le délestage.

Les méthodes actives et passives sont résumées au **Tableau 3-1** dans lequel elles sont classées selon le type de transfert d'énergie c'est-à-dire directement de la source d'énergie à la glace ou via le substrat.

Tableau 3-1 : Sommaire des méthodes de déglacage

		Transfert de l'énergie de déglacage	
		Directement à la glace	Via le substrat
ACTIVES*	Thermiques	<ul style="list-style-type: none"> • Liquides abaissant le point de fusion • Radiations infrarouges • Micro-ondes • Lasers • Jets de fluide chaud 	<ul style="list-style-type: none"> • Par effet Joule • Recouvrement de fils chauffants
	Mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • Bâton • Rouleaux • Couteaux • Racloir • Projectiles • Jets de particules abrasives • Robots automatiques • Ondes de choc 	<ul style="list-style-type: none"> • Alliage AMF • Torsion • Gains pneumatiques • Électro-expulsion • Systèmes vibratoires • Dispositif explosif
	Électrochimiques		<ul style="list-style-type: none"> • Dispositif électrolysant
PASSIVES†	Thermiques		<ul style="list-style-type: none"> • Gaine absorbant les rayons incidents
	Mécaniques		<ul style="list-style-type: none"> • Anneaux • Masse antigiratoire • Système éolien • Revêtement friable ou graisseux
	Chimiques		<ul style="list-style-type: none"> • Revêtements hydrophobes • Enduit abaissant le point de fusion de la glace • Revêtements chimiques actifs

* Apport énergétique extérieur lors de l'opération du système déglaçant.

† Aucun apport énergétique extérieur lors de l'opération du système déglaçant.

3.2.1 Les méthodes actives

Parmi les méthodes thermiques actives consistant à chauffer directement la glace, on compte le liquide abaissant le point de fusion de la glace, la radiation infrarouge et les micro-ondes, les jets d'air ou d'un liquide chaud. Par exemple, les liquides dégivrants et antigivre sont couramment utilisés sur les avions en attente de décollage dans les aéroports.

Les méthodes où la glace est chauffée via le substrat englobent celles où c'est l'élément à déglacer qui augmente en température afin de faire fondre la glace accrétée sur celui-ci. En effet, il existe des méthodes utilisant la chaleur provenant du conducteur dans lequel des courants CA ou CC élevés sont appliqués ou utilisant la chaleur d'un recouvrement de fils ferromagnétiques dans lequel un courant induit en CA est appliqué. Dans ce même groupe, il existe une méthode utilisant des gaz chauds pour le déglacage en vol des bords d'attaque des ailes d'avion. Lorsque les surfaces à déglacer ne sont pas très grandes, on peut les recouvrir d'une gaine chauffante comme c'est le cas pour la vitre arrière d'une automobile.

De façon générale, ces méthodes thermiques sont les plus efficaces. Toutefois, pour certaines applications à plus grandes échelles comme le cas des conducteurs électriques, elles sont très énergivores. Effectivement, il faut disposer d'une puissance électrique suffisante capable de soutenir les courants élevés nécessaires au déglacage.

Les méthodes mécaniques sont généralement les premières à être utilisées pour déglacer une surface. Elles consistent à frapper directement les dépôts de glace à l'aide d'outils divers tels

racloirs, bâtons, rouleaux, couteaux. Parfois, ces derniers sont opérés à distance au moyen de perche ou montés sur des robots commandés à distance. Elles comprennent également les méthodes un peu moins courantes où le choc mécanique est transmis vis le substrat. Différentes techniques ont été étudiées : un système vibratoire à mi-portée s'alimentant à même le courant de la ligne (N. D., Mulherin et al, 1988), une enveloppe pneumatique gonflable (C. A., Martin et al, 1992), un recouvrement de fils électro-expulsifs (J.L., Laforte et al, 2001) ou d'alliage à mémoire de forme (J., Gerardi et R., Ingram, 1995) et un dispositif de torsion (P., Desmeules, 1992). Pour finir, il existe une méthode active électrochimique développée par Petrenko (V. F., Petrenko, 1994) provoquant l'électrolyse du film d'eau et un dégagement simultané d'hydrogène H_2 et d'oxygène O_2 à l'interface facilitant le délestage.

3.2.2 Les méthodes passives

Les méthodes passives agissent toutes sur la glace via le substrat et se divisent en trois catégories soit : thermique, chimique et mécanique. Les revêtements solides hydrophobes, possédant peu d'affinité chimique avec l'eau et par le fait même diminuant la qualité du mouillage de leur surface s'avèrent efficaces contre l'accumulation de neige mouillée mais produisent un effet mitigé contre l'accumulation et l'adhérence de la glace. Effectivement, un revêtement solide de faible rugosité ou friable peut réduire l'adhérence de la glace (C., Laforte et J-L., Laforte, 2002) mais pas suffisamment pour être qualifié de glaciophobe. Pour leur part, les produits absorbant les radiations ne sont pas efficaces la nuit ou lorsque les radiations sont trop faibles.

Les produits liquides antigivrants présentement utilisés en aéronautique sont solubles dans l'eau et possèdent un point de fusion en dessous de celui de la glace. Leur solubilité avec l'eau dont l'apport augmente lors de précipitations finit par annuler l'effet antigivrant. Les produits visqueux ne réagissent aucunement avec l'eau et la glace. Cependant, même s'ils ne réagissent pas chimiquement, l'impact mécanique des gouttelettes d'eau ou de particules de glace exerce une action mécanique qui va détruire le film protecteur.

Les dispositifs mécaniques favorisant le délestage comprennent les anneaux, efficaces avec la neige mouillée; les masses antigiratoires, réduisant la quantité de glace accumulée et les systèmes éoliens convertissant l'énergie du vent en vibrations mécaniques. Ces dispositifs sont généralement moins coûteux mais ils sont des palliatifs au givrage.

3.3 LES PRINCIPAUX SYSTÈMES/MATÉRIAUX ACTIFS

Cette section présente les principaux système/matériaux actifs ou électroactifs répertoriés dans la littérature (V., White, 2005; Y., Bar-Cohen, 2002; Y., Bar-Cohen, 2001; Y., Bar-Cohen, 1999). La thèse n'ayant pas comme sujet principal l'étude de ces matériaux on se limitera ici à donner au lecteur une vue d'ensemble du domaine des matériaux intelligents. Ces derniers peuvent être regroupés en fonction des mécanismes de fonctionnement en jeu : pneumatique, ionique, électrique et thermique. Ils sont présentés au **Tableau 3-2** avec des exemples illustrant chaque catégorie.

Tableau 3-2 : Les principales catégories des systèmes/matériaux actifs

Section	Types de matériaux	Stimuli
3.3.1	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane gonflable 	Air comprimé
3.3.2	<ul style="list-style-type: none"> • Gels ioniques • Composite polymère-métal à échange ionique (CPMI). • Polymères conducteurs • Nanotubes de carbones 	Électrique par un mouvement ionique
3.3.3	<ul style="list-style-type: none"> • Élastomères diélectriques • Polymères électrostrictifs • Polymères cristallins ou céramiques piézoélectriques 	Électrique par le mouvement des dipôles ou attraction électrostatique
3.3.4	<ul style="list-style-type: none"> • Alliages à mémoire de forme 	Thermique

3.3.1 Pneumatique : Système McKibben

Le système McKibben est un système convertissant l'énergie pneumatique ou hydraulique d'un fluide en énergie mécanique. Il a été développé dans l'optique de la biorobotique cette discipline qui tente de reproduire les propriétés du corps humain. Ce système, activé par un gaz comprimé, permet de recréer un muscle humain ou animal. Le système a été développé vers les années 1950 par J.L. McKibben pour les patients atteints de polio (G.K., Klute et al, 1999) et est maintenant commercialisé par *Bridgestone Rubber Company* (Japon) pour des applications en robotique.

Ce système consiste en un tube gonflable recouvert d'une gaine métallique tressée qui se contracte sur le sens de la longueur par augmentation de la pression interne (**Figure 3-1**).

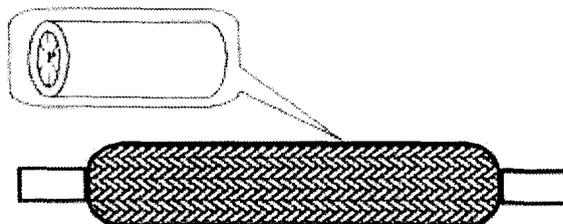


Figure 3-1 : Schéma d'un système McKibben (Klute et al.,1999)

La force ainsi créée par la contraction en longueur du muscle pneumatique est principalement fonction de sa longueur, la pression et la vitesse (C.P., Chou et B., Hannafort, 1994). Dans la littérature, le système est principalement développé pour reproduire un muscle humain. Cependant, dans cette thèse, ce système sera évalué en fonction de la déformation créée en surface. Ce système sera commenté à la suite des résultats expérimentaux obtenus et présentés à la section **6.9.1**.

3.3.2 Systèmes ioniques

Le mécanisme d'activation des systèmes ioniques est basé principalement sur le mouvement des ions sortant ou entrant du réseau atomique, lorsqu'ils sont soumis à un stimulus électrique et/ou qu'ils sont plongés dans une solution électrolytique. Pour déclencher l'entrée ou la sortie des ions, il faut concevoir un dispositif composé principalement d'électrodes et/ou de fluides activateurs bien adaptés au matériau électroactif utilisé ainsi qu'à la réponse recherchée.

Selon l'état actuel des connaissances, il est possible de les regrouper en quatre (4) principales sous-classes. Ces catégories tiennent compte à la fois des propriétés des différents matériaux électroactifs utilisés ainsi que du type d'arrangement. Il y a donc:

1. les systèmes à base de **gels**,
2. les systèmes qui fonctionnent avec des **polymères ioniques** dont l'actionneur le plus populaire est un composite polymère-métal à échange ionique (abréviation française CPMI et abréviation anglaise IPMC),
3. les systèmes à base de **polymères conducteurs**,
4. les systèmes à base de **nanotubes de carbones**

3.3.2.1 Les polymères actifs gels

Les *polymères gels* sont des polymères humides et mous capables de subir de grandes déformations pouvant atteindre jusqu'à 1000 fois leur volume initial. On retrouve ces gels principalement sous deux formes. La première forme est une fibre longue et mince qui se contracte sous l'influence d'un stimulus en formant une spirale compacte. La seconde, celle de la **Figure 3-2**, est un réseau réticulé du polymère qui subit un changement de volume (I.M., Khan et J.S., Harisson, 1999).

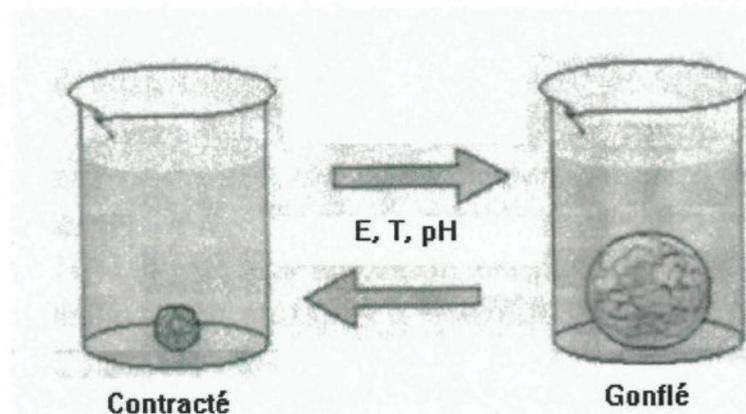


Figure 3-2 : Activation d'un gel réticulé (S.G., Wax et R.R., Sands, 1999)

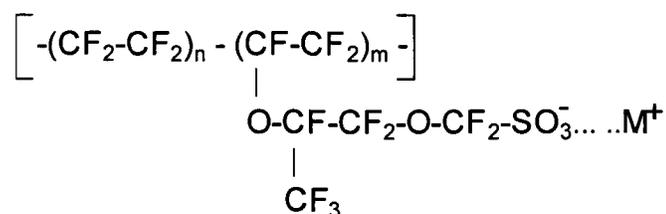
Pour pouvoir être utilisés comme actionneurs, tous les polymères gels doivent être immergés dans une solution aqueuse. Ces gels, sous l'influence du stimulus, échangent des éléments chimiques avec la solution qui les entoure et altèrent ainsi leur état moléculaire. Le système d'actionneur gel transforme ainsi l'énergie chimique libre directement en travail mécanique. C'est le seul système artificiel capable de faire cette conversion directement.

Les polymères gels les plus courants sont activés par des changements en pH et pour cette raison sont nommés : polymères pH actifs. Ils peuvent également réagir à des stimuli thermiques et électriques. Un système électrique comprend deux électrodes plongées dans la solution contenant le polymère gel. Les ions positifs de la solution se déplacent de l'électrode positive vers l'électrode négative et viennent s'unir aux molécules de gel chargées négativement sur la surface faisant face à l'électrode positive. C'est une réaction d'assemblage moléculaire électrocinétique. Ce processus produit la flexion du polymère gel. Les polymères gels sous forme de réseaux réticulés se dilatent quand ils reçoivent des ions de la solution et se

contractent quand les ions quittent le polymère pour passer dans la solution. La magnitude du changement de volume est directement proportionnelle à la densité de réticulation du gel. Comme le mécanisme d'activation des polymères gels est basé sur la diffusion des ions, leur vitesse de réaction est limitée par la vitesse de transport des ions (M., Doi et al., 1992) et (J., Ricka et T., Tanaka, 1984).

3.3.2.2 Les composites polymère-métal ioniques actifs (CPMI)

L'actionneur le plus populaire pour les polymères ioniques est appelé *actionneur composite de polymère-métal à échange ionique* (CPMI). Il est lui-même constitué d'un polymère ionique. Le polymère le plus utilisé pour ce genre d'application est le Nafion © (Dupont, Co.). Pour construire l'actionneur, on recouvre chaque côté du film de Nafion d'un métal noble, comme le platine. Le résultat est appelé membrane de polymère perfluoré d'échange ionique (MEI) (M., Shahinpoor et al., 1999; T.A.E., Loss et al., 1998; T., Okada et al., 1998)



où $m \approx 1$,
 $5 > n < 11$,
 M^+ : contre-ion H^+ , Li^+ ou Na^+

Figure 3-3: Structure moléculaire typique d'un polymère ionique

Le Nafion est un polymère qui conduit les ions. Sa structure est représentée à la **Figure 3-3**. Pour obtenir à partir d'un film de Nafion une membrane de polymère perfluoré d'échange

ionique, on lui joint de chaque côté une membrane métallisée formée par exemple de Pt qui servira d'électrode pour les obtenir en forme de dendrites (**Figure 3-4**) qui s'agrippent à la structure moléculaire du film de Nafion. Cette métallisation du film de Nafion se réalise en deux étapes. En premier lieu, on effectue une métallisation moléculaire complète où les ions métalliques Pt sont dispersés partout dans les régions hydrophiles du polymère. En second lieu, on effectue un platinage ou électrodéposition sur la surface qui permet la formation des dendrites.

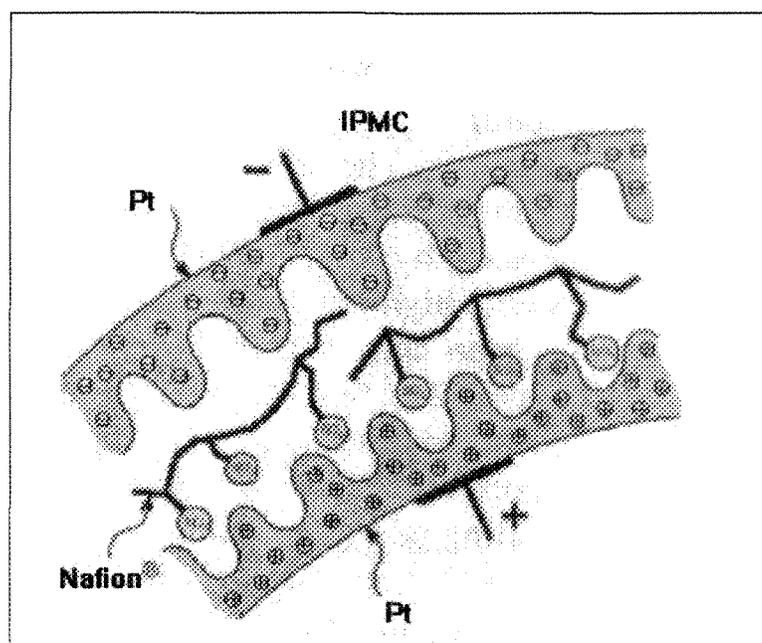


Figure 3-4: Microstructure d'un actionneur CPMI (S.G., Wax et R.R., Sands, 1999)

Le mécanisme d'activation CPMI est basé également sur le transport des ions. Le Nafion contient des groupes ionisants fixes (SO_3^-) dans sa chaîne principale qui ont la propriété de se dissocier et qui peuvent atteindre une charge nette dans une variété de solvants. Ces groupes sont appelés polyions et ils peuvent produire un champ électrique de grande intensité

($\sim 10^{10}$ V/m). Pour que cette dissociation se produise, la membrane doit baigner dans un liquide qui contient des ions mobiles, par exemple des ions Li^+ . En appliquant un champ électrique sur la membrane CPMI, les ions fixes (SO_3^-) et les ions mobiles (Li^+) se déplacent de leur position naturelle vers l'électrode de charge opposée (**Figure 3-5**). Le déplacement des ions produit une dilatation du côté de la surface face à l'électrode négative et une contraction du côté de l'électrode positive. La déformation du matériau qui en résulte est due à la fois à la migration des ions dans la structure de la membrane et aux interactions qui se créent entre le champ externe et le propre champ interne produit par la structure.

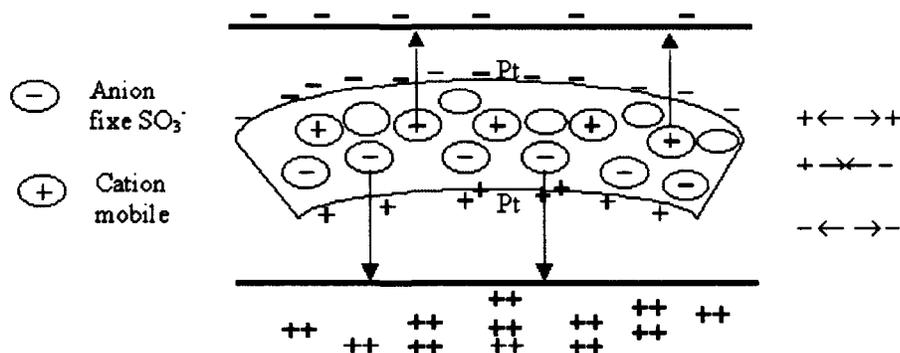


Figure 3-5: Mécanisme de déformation des membranes CPMI.

Le mécanisme d'activation des membranes CPMI est réversible et les voltages de travail sont peu élevés (1-5 V). En principe, ces membranes peuvent travailler à des températures allant jusqu'à -140 °C de même que sous vide. Toutefois, la force d'activation qu'elles produisent est encore faible et il faut maintenir la membrane humide ou scellée pour que sa capacité d'activation ne diminue pas.

3.3.2.3 Les polymères conducteurs actifs

Les polymères conducteurs sont semblables aux gels, car leur changement dimensionnel est produit par le mouvement des ions à l'intérieur ou à l'extérieur de leur réseau. Comme dans les systèmes déjà décrits, les polymères conducteurs exigent une anode, une cathode et un électrolyte. L'avantage dans le cas des polymères conducteurs est que les électrodes peuvent être fabriquées indépendamment du matériau conducteur et l'électrolyte liquide peut être substitué par un électrolyte solide.

Le polypyrrole, le polythiophène et les fibres de polyaniline (PANi) sont trois exemples de ce type de polymères. Ils peuvent subir des oxydations et des réductions électrochimiques réversibles et continues dans un milieu électrolyte liquide ou solide. Un stimulus électrique dans ces conditions produit des changements structurels dans leur chaîne de polymère ainsi que l'ouverture ou la fermeture de leurs enchevêtrements, ce qui permet l'entrée ou la sortie des ions et produit alors un changement de leur conductivité, leur couleur et surtout leur volume (T.F., Otero et J.M., Sansinena, 1997 et 1995; D., De Rossi et A., Mazzoldi, 1999).

En utilisant ce principe de fonctionnement, plusieurs chercheurs ont créé différents systèmes d'activation. Un exemple, est celui du type triple couche (*Trilayers Device*) qui est formé d'une membrane d'un polymère électrolyte solide entouré de deux couches d'un polymère conducteur arrangé comme montré à la **Figure 3-6**. L'actionneur peut être fait à base de polypyrrole et de LiClO_4 . L'application d'un courant produit un mouvement angulaire de la membrane triple-couche dans un sens ou dans l'autre selon que le courant appliqué est

anodique ou cathodique (**Figure 3-7**). Le flux de courant entre les films de polypyrrole est supporté par les mouvements ioniques à l'intérieure du polymère électrolyte solide.

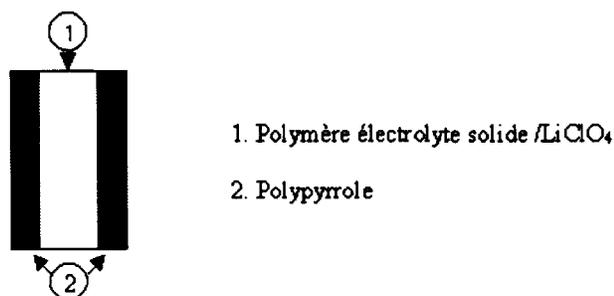


Figure 3-6: Film actionneur triple couche (polypyrrole-polymère électrolyte solide/LiClO₄-polypyrrole).

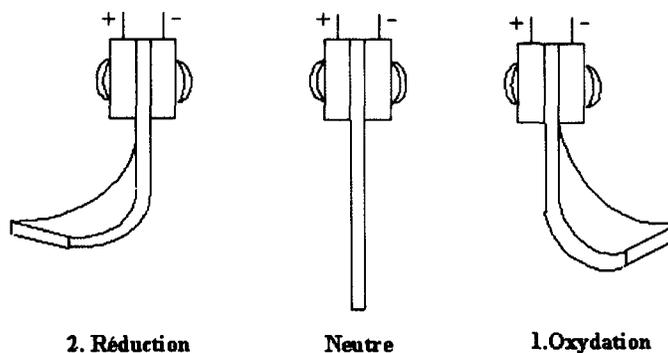


Figure 3-7: Mouvement angulaire de la membrane triple-couche pendant l'application d'un courant électrique.

La déformation de la membrane triple-couche est réversible et peut être produite de façon répétitive. L'application d'un courant anodique (1. Oxydation) fait que la chaîne principale perd des électrons en produisant des charges positives. Alors, pour maintenir l'électroneutralité du système, les anions entrent dans les enchevêtrements du polymère par des canaux qui s'ouvrent, et le volume de la membrane augmente du côté cathodique. Si le processus est inversé, c'est-à-dire si le courant devient cathodique (2. Réduction), les électrons sont expulsés

du polymère et les charges positives sont neutralisées. Alors les anions sortent, les canaux se ferment et le volume du côté cathodique diminue. Le flux de courant à travers le film provoque ainsi le mouvement angulaire de la partie libre de la triple-couche.

3.3.2.4 Les nanotubes de carbone actifs

Les systèmes matériaux/actif utilisant les nanotubes de carbone sont parmi les plus récents développés. Il existe différents mécanismes d'activation pour ces systèmes mais le plus prometteur* serait celui de l'injection de charge dans une double couche de nanotubes de carbone simple (*Single-wall nontubes*, SWNTs) via des électrodes et un électrolyte. Présentement, de tels systèmes sont surtout étudiés afin de produire des applications à très petite échelle appelés microélectromécaniques (*Micro-electro-mechanical devices*, MEMs) ou même nanoélectromécaniques (*Nano-electro-mechanic*, NEMs).

* Selon Spinks, Wallace, Baughman et Dai, auteurs du chapitre sur les systèmes d'activation à base de nanotubes de carbone du Livre : *Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles*, Bar-Cohen, 2001

Cependant, l'avancement de la recherche sur les modes d'assemblage des tubes (feuilles ou fibres) pourrait rendre leur application à l'échelle macroscopique possible.

Les systèmes ioniques ont un mécanisme d'activation basé sur la diffusion des ions. Donc, la vitesse de réaction des systèmes est limitée par la vitesse de transport des ions. Or, à froide température, comme lors d'un déglçage, les ions voyagent plus difficilement. Ainsi, la vitesse d'activation est diminuée, rendant plus difficile l'utilisation de ces types de système au déglçage.

3.3.3 Systèmes électriques

3.3.3.1 Terminologie

Avant de commencer cette sous-section, il est important de faire la distinction entre les systèmes électriques et ceux déjà présentés. Tout d'abord, le terme électrique a été choisi pour désigner les mécanismes où participent directement sans transport d'ions, les charges électriques soit des dipôles ou des électrodes. On distingue quatre classes de matériaux actifs soit : les polymères diélectriques, les polymères électrostrictifs, les polymères piézoélectriques et les céramiques piézoélectriques.

3.3.3.2 Les élastomères diélectriques actifs

Un polymère diélectrique qui est intrinsèquement un isolant est actif lorsque soumis à un champ électrique. Il se déforme alors à volume constant, c'est-à-dire aminci tout en augmentant sa surface (**Figure 3-8**) (M., Benslimane et P., Gravesen, 2002). Un tel système est formé en plaçant une couche d'élastomère diélectrique en sandwich entre deux électrodes. En

présence d'un champ électrique appliqué, l'élastomère se déforme due à l'effet Maxwell créant une force électrostatique (P., Sommer-Larsen et al., 2002). La pression p (Pa) ainsi produite est :

$$p = \epsilon \epsilon_0 E^2 = \epsilon \epsilon_0 (V/e)^2 \quad \text{Équation 3-1}$$

où : ϵ = cte diélectrique du matériau

ϵ_0 = permittivité du vide ($8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$)

E = champ électrique imposé (N/C)

V = voltage appliqué (V)

e = épaisseur du polymère (m)

Plusieurs élastomères diélectriques ont fait l'objet d'études pour utilisation comme matériel actif dans les systèmes électriques comme l'acrylate adhésive VHB^{MC} 4910 de 3M^{MC}, le silicone Sylgard® de Dow Corning et l'Élastosil® de Wacker (Y., Bar-Cohen, 1999).

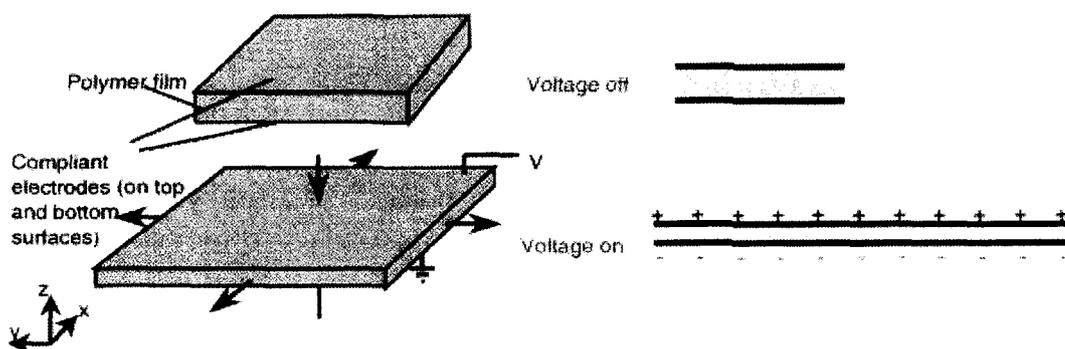


Figure 3-8 : Système actif d'élastomère diélectrique (R., Pelrine et al., 2002)

3.3.3.3 Les polymères électrostrictifs actifs

Comme les polymères diélectriques, les polymères électrostrictifs ont la capacité de se déformer en s'aplatissant dans le sens de leur épaisseur et s'étendant dans le sens de leur surface. Ce sont, de fait, des polymères diélectriques, polaires ou ferroélectriques* présentant un module d'Young, E , généralement inférieur à 1 MPa. Un actionneur électrostrictif est constitué d'un film de polymère électrostrictif et de deux électrodes flexibles. Lorsqu'une tension électrique est appliquée à un tel actionneur, les charges positives se retrouvent sur une électrode et les charges négatives sur l'autre. Comme ces charges opposées s'attirent, le film dans le sens de l'épaisseur est comprimé. La compression du film de polymère est due d'une part à la force électrostatique qui se développe entre les électrodes (Maxwell) et dans l'autre part à l'attraction des dipôles à l'intérieur du polymère. La littérature ne fait pas toujours la distinction entre l'électrostriction et l'effet Maxwell. Un des copolymères dont le comportement électrostrictif a souvent été étudié est le poly (vinylidène fluorure-trifluoroéthylène) irradié d'électrons (P(VDF-TrFE)) (Z-Y., Chen et al, 2002; Xu et HEAL, 2001; S.J., Gross et al., 1999).

Les systèmes diélectriques et électrostrictifs actifs, produisant les plus grandes déformations pour un voltage donné, sont malheureusement ceux dont la membrane est la plus mince. Leur utilisation à grande échelle pour déglacer est donc difficilement envisageable.

* Polarisation spontanée sous l'action d'un champ électrique

3.3.3.4 Polymères cristallins ou céramiques piézoélectriques actifs

La piézoélectricité est la capacité de certains cristaux et polymères cristallins comme le quartz, les titanates de zirconium de plomb et les polyimides (Ounaies, 1999) de générer une tension électrique par polarisation proportionnelle aux contraintes mécaniques appliquées. Dans les systèmes matériaux/actifs, c'est la piézoélectricité inverse qui est exploitée, c'est-à-dire que le cristal se déforme lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Les principales applications des systèmes piézoélectriques sont présentement les dispositifs antivibratoires, les systèmes de micropositionnement, les micromoteurs, et les valves de contrôles (H., Borgmann, 2004)

3.3.4 Alliages à mémoire de forme AMF

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des alliages qui changent de forme lorsqu'ils sont chauffés à une température donnée plus basse que le point de fusion et, lors du refroidissement, vont reprendre leur forme initiale. Cet effet mémoire est dû à la présence d'une phase métastable provoquée par une transformation martensitique réversible de certains alliages dont les plus courants sont : Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Be, Au-Cd et le Ni-Ti (V., Brailovski et al. 2003). Ces alliages sont déjà utilisés comme système d'activation dans plusieurs domaines:

astronautique : structures qui se déploient par elle-même dans l'espace après leur lancement

industriel : valves de contrôle, sonde et moteurs

médical : *Stent*^{*}, agrafes chirurgicales

* Le tube en AMF est inséré contracté (à sa plus petite taille) dans l'artère bouchée et est chauffé afin de le dilater et par le fait même dilater l'artère.

3.3.5 Performance des systèmes/matériaux actifs

Le **Tableau 3-3** liste les principaux systèmes/matériaux décrits dans les sections précédentes en y mentionnant les déformations attendues, le niveau de contraintes atteint ainsi que la tension nécessaire à l'activateur.

Le système/matériaux produisant la plus grande déformation est celui composé de gel avec des déformations pouvant atteindre 1000 %. Cependant, la contrainte qu'il génère reste la plus faible valant entre 0,001 et 0,01 MPa et les systèmes aqueux doivent être enveloppés de façon hermétique rendant leur application au déglçage difficile. Le type de système produisant les plus grandes contraintes sont ceux utilisant des AMF avec environ 700 MPa. Mais, après plusieurs retours à l'état initial, le système se dégrade. Les gels, les CPMI, les polymères conducteurs et les nanotubes de carbone nécessitent les tensions électriques les plus faibles valant entre 1 à 10 V. Toutefois, les polymères diélectriques, électrostrictifs et les piézoélectriques fonctionnent à une tension électrique de l'ordre du kV.

Tableau 3-3 : Principales propriétés actives des systèmes/matériaux actifs

Types	Propriétés		Commentaires
McKibben *	Déformation	Non déterminée	
	Contrainte (à 5 bar)	1,4 – 0,88 MPa	
	Pression opérationnelle	variable	
Gels [†]	Déformation	Jusqu'à 1000 %	Doivent être enveloppés hermétiquement
	Contrainte	0,001-0,1 MPa	
	Voltage opérationnel	1-5 V	
CPMI *	Déformation	>10%	Doivent être enveloppés hermétiquement Performance diminuée par une baisse de température
	Contrainte	0,1-3 MPa	
	Voltage opérationnel	<10V	
Polymères Conducteurs [†]	Déformation	~2%	Doivent être enveloppés hermétiquement Performances améliorées à petite échelle
	Contrainte	<34 MPa	
	Voltage opérationnel	<10 V	
Nanotubes de carbone [†]	Déformation	~0,2%	À petite échelle (µm) mais en développement pour l'utilisation à plus grande échelle (mm)
	Contrainte	>10 MPa	
	Voltage opérationnel	<10 V	
Polymères diélectriques et électrostrictifs [†]	Déformation	20-380%	Performances améliorées à petite échelle
	Contrainte	~1 MPa	
	Voltage opérationnel	>1 kV	
Piézoélectriques	Déformation	<1,7%	
	Contrainte	10 ² MPa	
	Voltage opérationnel	~1 kV	
AMF*	Déformation	<8%	
	Contrainte	~700 MPa	
	Voltage opérationnel	Non applicable	

* Chou et Hannaford, 1994

† Bar-Cohen, 2001

3.4 LES ÉLECTROACTIFS APPLIQUÉS AU DÉGLAÇAGE : LEUR POTENTIEL ET LEURS LIMITES

3.4.1 Pneumatique

Initialement développée par l'industrie aéronautique, cette technique consiste à gonfler une gaine extensible par injection rapide d'un gaz créant ainsi une impulsion mécanique capable de briser la glace. Cette technique est utilisée et opérationnelle par exemple pour déglacer les bords d'attaque d'ailes d'avion et des entrées d'air des moteurs d'avion. Cependant, le déglacage obtenu peut être partiel (il reste des morceaux de glace collés à la surface) et l'installation du système est complexe dû à l'apport de gaz pressurisé nécessaire. L'efficacité du système diminue au fur et à mesure que le matériel de la gaine gonflable se détériore.

3.4.2 Piézoélectrique

Il existe des brevets d'invention décrivant des techniques de déglacage utilisant un matériau piézoélectrique comme principale composante des systèmes d'activation. Broussoux et ses collègues de Thomson-CSF en France proposent un tel système pour enlever la glace formée sur des surfaces verticales comme celles des antennes ou celles des systèmes optiques (D., Broussoux et al., 1992). Également, Finke et Bank (R.C., Finke et B.A., Banks, 1985) ont breveté un système déglaçant utilisant un mécanisme constitué de plusieurs couches de céramique piézoélectrique reliées entre elles. Ce système est proposé pour le déglacage des bords d'attaque des ailes d'avions en remplacement des gaines gonflables pneumatiques ou des dispositifs acoustiques. Dans les deux cas, l'effet électromécanique du piézoélectrique est utilisé pour produire une vibration suffisamment puissante pour briser ou enlever la glace. Les brevets décrivent dans les détails comment fabriquer de tels systèmes et donnent les modes

opérateurs à préférer selon les conditions de givrage: type, épaisseur du dépôt, la température de l'air, etc. Toutefois, à notre connaissance, aucun des systèmes précédemment mentionnés n'est commercialement disponible actuellement. Également, aucune donnée sur l'aspect détérioration des systèmes ne sont présentées.

Au centre de recherche sur l'ingénierie électronique et acoustique de l'université *Pennsylvania State*, M. Ramanathan et ses collègues ont développé un système de dégivrage des pales d'hélicoptères utilisant une activation piézoélectrique (S., Ramanathan et al., 2002). Ils ont utilisé une plaque de *piezo lead zirconate titanate* (PZT-5A ou PZT-8), recouverte d'une électrode d'argent qui a été collée à une plaque d'aluminium de l'épaisseur d'une pale d'hélicoptère. La plaque piézoélectrique est alimentée à une fréquence de 1 MHz soit à sa valeur de fréquence de résonance. Par manque d'installations réfrigérées adéquates, on doit d'abord pulvériser de l'eau sur la plaque à 2°C avant de la refroidir pour obtenir une épaisseur de glace d'environ 1,5 mm. Avec le PZT-8 générant des ondes de cisaillement horizontales, on a fait fondre une couche de glace de 1,5 à 2,5 mm en environ 2 à 5 minutes. Sur la base de ces données, il semble que le dégivrage s'est produit de façon thermique plutôt que mécanique.

À cette même université, au département de l'ingénierie aérospatiale, un étudiant a fait l'étude empirique d'un système de dégivrage utilisant des tubes piézoélectriques applicables aux pales d'hélicoptères. L'étude théorique porte principalement sur les calculs relatifs aux caractéristiques de conception mais demeure au stade conceptuel sur le dégivrage. Aucune donnée expérimentale sur les propriétés adhérentes de la glace n'est donnée.

3.4.3 AMF

Dans l'étude exhaustive sur les méthodes de déglçage (J.N., Laflamme et al., 2002), on dénombre sept documents dont quatre (4) brevets sur le déglçage utilisant la déformation créée par des alliages à mémoire de forme. Les auteurs concluent que la faisabilité du concept reste encore à démontrer et que la méthode demeure énergiquement coûteuse en raison du chauffage nécessaire à l'amorce de la transformation martensitique. De plus, le retour à l'état initial du système par un refroidissement peut être long et donc empêcher de pouvoir utiliser le système à plusieurs reprises dans un court laps de temps.

Comme pour les études sur les systèmes piézoélectriques, il y a très peu de données expérimentales indiquant les conditions où se produit le déglçage. Seul un article de Gerardi, Ingram et Catarella présenté à l'*International Icing Symposium 95* (J.,Gerardi et al.,1995) mentionne, sans plus de précision, que la déformation nécessaire au déglçage se situe en **0,1 et 0,3 %** et que la contrainte mesurée en cisaillement vaut de 0 à 200 Psi, soit de 0 à 1,4 MPa.