

CeTe

Nord Picardie

Laboratoire
Régional
des Ponts
et Chaussées
de Lille

pour comprendre le présent et construire l'avenir



STAC

Service Technique

de l'Aviation Civile

Division Environnement

Décembre 2006

Etude des impacts environnementaux et sanitaires des dégivrants, des déverglaçants et de leurs additifs utilisés sur les plates-formes aéroportuaires

Rapport d'étude



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



ministère
des Transports
de l'Équipement
du Tourisme
et de la Mer

Résumé non technique

Les opérations de dégivrage et déverglçage menées sur les aéroports occasionnent le déversement de fondants chimiques, principalement composés en France de glycols (propylène glycol), d'acétates et de formiates. Nous avons recensé dans le cadre de cette étude confiée par le STAC les effets connus des composants principaux des fondants utilisés et de leurs additifs sur l'environnement et la santé humaine.

Il s'avère que si d'une façon générale l'apport de ces produits fortement biodégradables peut provoquer un risque de désoxygénation et d'eutrophisation des milieux récepteurs, leur toxicité est malgré tout considérée comme faible par les spécialistes.

Le principal risque d'un point de vue environnemental et sanitaire est représenté par la présence des additifs (triazoles et éthoxylates d'alkylphénols) dont la toxicité s'exprime à de très faibles concentrations.

Un effort particulier doit donc être porté sur les pratiques de viabilité hivernale (composition des produits utilisés, techniques de mise en œuvre, etc.) mais aussi sur la mise en place de systèmes d'assainissement des eaux de ruissellement de façon à concilier impératif de sécurité du trafic aéroportuaire et protection des eaux de surface.

Sommaire

Résumé non technique

I.	CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE	5
I.1	Contexte	5
I.2	Objet de l'étude	5
II.	METHODOLOGIE.....	6
II.1	Evaluation des impacts environnementaux et sanitaires.....	6
II.1.1	Impacts des produits sur l'environnement.....	6
II.1.2	Evaluation des risques sanitaires.....	6
II.2	Méthodologie d'étude	7
III.	FONDANTS UTILISES EN ZONES AEROPORTUAIRES.....	8
III.1	Identification des produits utilisés.....	8
III.1.1	Dégivrage des avions	8
III.1.2	Déverglaçage des aires aéronautiques	9
III.1.3	Additifs contenus dans les produits dégivrants et déverglaçants.....	10
III.1.4	Substances retenues pour l'étude	11
III.2	Caractéristiques physico-chimiques des substances	11
III.2.1	Dégivrants.....	11
Glycols	11	
III.2.2	Déverglaçants	12
Urée technique	12	
Acétates.....	12	
Formiates.....	13	
III.2.3	Additifs	13
Benzotriazoles	13	
Alkylphénols.....	13	
Nonylphénols et octylphénols	13	
Ethoxylates de nonylphénols	14	
IV.	IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT.....	15
IV.1	Considérations générales.....	15
IV.1.1	Quels transferts, vers quels milieux	15
Notion de transport des polluants	15	
Dégivrage des avions	15	
Déverglaçage des aires aéronautiques	16	
IV.1.2	Quels impacts sur les milieu récepteurs	17
Eutrophisation.....	18	
Rapport C/N.....	18	
Désoxygénation du milieu.....	18	
IV.1.3	Quelles charges dans les eaux de ruissellement.....	19

IV.2	Impacts des dégivrants sur l'environnement	20
IV.2.1	Les glycols	20
	Impacts sur les eaux.....	20
	Impacts sur le sol.....	21
	Impacts sur les végétaux.....	21
IV.3	Impacts des déverglaçants sur l'environnement	22
IV.3.1	Les produits azotés.....	22
IV.3.2	Les acétates et les formiates	22
	Impacts sur les eaux.....	22
	Impacts sur le sol.....	23
	Impacts sur les végétaux.....	23
	Acétate de sodium	24
	Acétate de potassium	24
	Formiate de sodium.....	25
	Formiate de potassium	25
IV.4	Impacts des additifs sur l'environnement	26
IV.4.1	Les triazoles.....	26
IV.4.2	Les alkylphénols	26
	Accumulation en milieu aquatique.....	27
	Processus de dégradation.....	27
	Toxicité	27
V.	IMPACTS SUR L'HOMME	29
V.1	Impacts des dégivrants sur la santé humaine	29
V.1.1	Les glycols	29
V.2	Impacts des déverglaçants sur la santé humaine	29
V.2.1	Les produits azotés	29
V.2.2	L'acétate de potassium	30
V.2.3	Les formiates.....	30
V.3	Impacts des additifs sur la santé humaine	30
V.3.1	Les triazoles	30
V.3.2	Les alkylphénols.....	31
VI.	CONCLUSIONS	32
VII.	FICHES PRATIQUES PAR SUBSTANCE.....	34

Ce rapport d'étude a été rédigé par C. HEBRARD-LABIT, responsable du groupe Eau et sols au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille.

Liste des annexes

Annexe 1 :

Nomenclature des principaux alkylphénols retrouvés dans l'environnement

Annexe 2 :

Propylène glycol

INERIS, Fiche substance, 2005

INTERCHIMIE, Fiche de données de sécurité, 2001

INRS, Fiche toxicologique n°226, 1994

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Urée

Fiches internationales de sécurité chimique, 1993 et 1999

Acétate de sodium

Fiches internationales de sécurité chimique, 1993 et 1999

Acétate de potassium

Fiches internationales de sécurité chimique, 1993 et 1999

Formiate de sodium

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Annexe 3 :

Notices descriptives des sites Internet des bases de données CHEMINFO, CHEMINDEX, et CHEM-BANK

Liste des illustrations

Tableaux :

Tableau 1 : Principaux dégivrants utilisés en France (issus de l'enquête STAC, 2006) _____ 9

Tableau 2 : Principaux déverglaçants utilisés en France (issus de l'enquête STAC, 2006) 10

I. Contexte et objet de l'étude

I.1 Contexte

Les activités aéroportuaires, de par le déplacement des aéronefs et l'utilisation des équipements au sol, génèrent l'arrivée de nombreuses substances polluantes et susceptibles d'être toxiques sur les aérodromes exploités. Parmi celles-ci les opérations de déverglaçage et de dégivrage, nécessaires au maintien de l'activité aérienne dans les régions exposées à un froid intense, occasionnent le déversement de produits chimiques à base d'acétates, de formiates et de glycols pouvant induire des risques pour les milieux naturels et notamment la ressource en eau.

Afin de respecter les seuils de rejet imposés aux gestionnaires d'aérodromes, et de diminuer les impacts potentiels sur les milieux récepteurs, il est important de limiter l'utilisation de fondants chimiques polluants sur les plates-formes. La réflexion doit ainsi porter sur les possibilités de développer des produits dégivrants et déverglaçants plus respectueux de l'environnement, et d'améliorer les méthodes d'application et les systèmes de récupération et de traitement des produits.

I.2 Objet de l'étude

Dans ce contexte et suite à deux premières études initiées en 2001 et 2002 sur les processus de dégradation des produits chimiques utilisés, la Division Environnement du Service Technique de l'Aviation Civile (STAC) a mis en place un groupe de travail sur cette thématique, rassemblant gestionnaires et scientifiques, afin d'alimenter la réflexion et encadrer la réalisation d'études complémentaires sur le sujet.

Parmi celles-ci, le STAC a confié au Cete Nord Picardie / Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille la réalisation d'une étude à caractère bibliographique portant sur les impacts environnementaux et sanitaires des fondants chimiques utilisés en viabilité hivernale sur les aéroports.

Ce rapport présente la synthèse des données et références disponibles relatives aux impacts sur l'environnement et la santé des dégivrants, déverglaçants les plus employés (propylène glycol, urée technique, acétates et formiates de sodium et potassium) et certains de leurs additifs.

II. Méthodologie

II.1 Evaluation des impacts environnementaux et sanitaires

II.1.1 Impacts des produits sur l'environnement

La définition précise des impacts de substances potentiellement polluantes sur l'environnement suppose la connaissance de nombreux paramètres tels que la nature des produits considérés, le flux généré par l'activité, la localisation et l'exposition des milieux naturels de proximité (air, eaux souterraines et superficielles, sols), données relatives à la faune et la flore susceptibles d'être exposées à la pollution, etc.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes attachés, par une approche essentiellement bibliographique, à recenser les impacts et effets connus, constatés lors de travaux d'étude et/ou de recherche précédents, sur les écosystèmes.

II.1.2 Evaluation des risques sanitaires

De façon générale, la démarche développée en 2003 par l'INERIS¹ afin d'évaluer le risque sanitaire lié à l'utilisation de produits chimiques comprend quatre étapes successives :

1. l'identification des dangers qui consiste à répertorier la liste des substances dangereuses présentes sur le site d'étude et à identifier les effets indésirables que ces dernières sont intrinsèquement capables de provoquer chez l'homme,
2. l'évaluation de la relation dose-réponse qui permet d'estimer la relation entre la dose ou le niveau d'exposition aux substances, et l'incidence et la gravité de ces effets,
3. l'évaluation de l'exposition qui consiste à déterminer les émissions, les voies de transfert et les vitesses de déplacement des substances et de leur transformation afin d'évaluer les concentrations auxquelles les populations humaines sont exposées ou susceptibles de l'être,
4. la caractérisation du risque, étape finale de l'évaluation, au cours de laquelle sont synthétisées et intégrées sous la forme d'une expression quantitative du risque, ou à défaut qualitative, les informations issues des étapes précédentes.

¹ Pour les études d'impacts des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

Nous avons par conséquent recherché dans le cadre de cette étude des informations relatives aux étapes décrites ci-dessus, et en particulier aux deux premières, identification des dangers et évaluation de la dose-réponse, de façon à mieux cerner les effets potentiels des principaux composants des fondants chimiques et de leurs additifs sur la santé humaine.

II.2 Méthodologie d'étude

Un travail d'enquête a été mené au cours de l'année 2006 par le STAC auprès de plusieurs aéroports nationaux afin de connaître, sur la base d'informations recueillies sur les trois dernières périodes hivernales, l'état des lieux des pratiques actuelles en matière de dégivrage et de déverglaçage sur les différentes plates-formes françaises.

Parallèlement à ce travail, un recensement des produits commerciaux utilisés en viabilité hivernale a été réalisé par Sabine Staal, au cours d'un stage de l'ENTPE² effectué au STAC sur ce thème.

Ces deux enquêtes ont permis d'identifier les composants principaux des produits les plus couramment utilisés et d'arrêter ainsi la liste des substances entrant dans le cadre de la présente étude bibliographique. Cette dernière concerne donc essentiellement :

Pour les dégivrants : le propylène glycol,

Pour les déverglaçants : l'urée technique et les acétates et formiates de sodium et de potassium,

Pour les additifs : les triazoles et benzotriazoles, les alkylphénols (nonylphénols, octylphénols) et éthoxylates d'alkylphénols.

Les données et informations recueillies et présentées dans cette synthèse portent sur :

- les propriétés physico-chimiques des produits,
- leurs impacts sur l'environnement : modalités de transfert suivant différents paramètres (solubilité, bio dégradabilité, etc.), impacts sur la faune et la flore des milieux récepteurs,
- leurs effets probables sur l'homme, lorsque les données étaient disponibles.

Chaque composé étudié fait ensuite l'objet d'une fiche pratique reprenant de façon synthétique des données s'y référant.

² Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

III. Fondants utilisés en zones aéroportuaires

En conditions hivernales, l'exploitation des plates-formes aéroportuaires nécessite le recours à plusieurs produits chimiques afin de lutter contre le gel et le verglas. Ces pratiques occasionnent une pollution saisonnière provenant :

- du dégivrage des avions (utilisation de produits à base de glycols),
- du déverglaçage des aires de stationnement et de circulation (utilisation d'acétates et formiates principalement),

Les polluants liés à la viabilité hivernale font partie, avec les matières en suspension et les hydrocarbures, des principaux polluants à traiter sur une plate-forme aéroportuaire [Thirionet et Gregeois, 2000].

III.1 Identification des produits utilisés

III.1.1 Dégivrage des avions

Pour les avions, le plus grand risque occasionné par le gel concerne l'altération du profil de leurs ailes par l'accumulation de glace à leur surface. La pulvérisation de produits chimiques, généralement à base de glycols, permet ainsi :

- de prévenir la formation de glace, cette opération s'appelle l'antigivrage (préventif),
- d'enlever la glace formée, juste avant le décollage, on parle alors de dégivrage (curatif) [Thirionet et Gregeois, 2000, Le Déan *et al.*, 1995].

Les produits utilisés sont classés en différents types (de I à IV) selon l'objectif qui leur est assigné (préventif, curatif) et leur mode d'utilisation (température, dilution). Les quantités de produits dilués utilisés sont variables et dépendent de l'aéroport, de la typologie du trafic, des conditions climatiques mais aussi des moyens de dégivrage mis en œuvre [Thirionet et Gregeois, 2000].

D'après l'enquête menée par le STAC [Mars, 2006] auprès de gestionnaires d'aéroports et contacts pris avec les fournisseurs, les produits dégivrants les plus utilisés en France sont composés principalement de propylène glycol (Tableau 1), substance de la famille des glycols qui présentent l'avantage d'être non corrosifs pour les aéronefs [Le Déan *et al.*, 1995].

Tableau 1 : Principaux dégivrants utilisés en France (issus de l'enquête STAC, 2006)

Nom commercial	SPCA DE-950	ECOWING 26	Kilfrost DF PLUS	Kilfrost ABC 2000	Kilfrost ABC-S
Société	ABAX industrie-SPCA	ABAX industrie-SPCA			
Composition	Monopropylène glycol	Monopropylène glycol	Monopropylène glycol	Monopropylène glycol	Monopropylène glycol
Solvants organiques	81,00%	51,70%	au moins 80% glycol	50% monopropylène glycol	au moins 50% glycol
Eau	17,10%	47,80%			
Additifs	"non dangereux" (*)	"non dangereux"	systeme d'inhibiteur de corrosion, inhibiteur minimisant les risques d'inflammabilité du produit	sans triazole	
Type	I	II	I	II	IV
Forme	liquide	visqueux	liquide		fluide
Couleur	orange	incolore	incolore ou orange à la demande		vert ou quasiment incolore (à la demande)

(*) annoncé comme tel par le fournisseur

III.1.2 Déverglçage des aires aéronautiques

En conditions hivernales rigoureuses, la contamination des aires aéronautiques par la neige, le givre ou le verglas impose la mise en place d'opérations de déverglçage des pistes, des aires de manoeuvre et de stationnement afin de les rendre praticables à la navigation aérienne en toute sécurité. On a alors recours, comme pour les avions, à des produits chimiques permettant d'abaisser le point de congélation de l'eau. Ces opérations de déverglçage chimique sont combinées dans 80% des cas à des opérations de déneigement mécaniques.

L'urée longtemps employée et très efficace est progressivement abandonnée pour des problèmes d'environnement (abordés dans la suite de ce rapport) [Le Déan *et al.*, 1995]. Son utilisation est désormais fortement déconseillée en France. Les produits actuellement utilisés en remplacement sont les acétates et les formiates (de sodium et potassium). Ces produits ont un coût supérieur à celui de l'urée, mais sont très efficaces pour déverglçer les surfaces aéronautiques, tout en respectant davantage l'environnement [Services hivernaux, 2002, Thirionet et Gregeois, 2000].

En France, ce sont les produits à base d'acétate qui sont majoritairement utilisés, en particulier l'acétate de potassium sous forme liquide [Mars, 2006]. On trouve également de l'acétate de sodium (formule exothermique) et des acétates de calcium et de magnésium. Il existe également des formules à base de formiate, et notamment de formiate de potassium. Le formiate de sodium présente l'inconvénient majeur d'être susceptible de dégrader le béton ; il n'est donc considéré qu'en dernier recours. Les formiates sont cependant très utiles en cas de froid intense et ils sont davantage utilisés dans les régions où les

températures peuvent être très basses (Canada, pays nordiques) [Services hivernaux, 2002, Thirionet et Gregeois, 2000].

En plus du composé principal, le produit commercial contient un certain nombre d'inhibiteurs de corrosion et autres additifs dont la composition reste protégée par le secret industriel. La quantité de produit épandue est variable et dépend des politiques hivernales choisies [Mars, 2006, Thirionet et Gregeois, 2000].

D'après l'étude menée par S. Staal, les produits déverglaçants les plus utilisés en France sont composés principalement d'acétates et de formiates de sodium et de potassium (Tableau 2).

Tableau 2 : Principaux déverglaçants utilisés en France (issus de l'enquête STAC, 2006)

Nom commercial	Safeway KA runway deicer	SAFEGRIP	SAFREGIP FR	CRYOTECH E36	Cryotech NAAC
Société	Clariant	Abax Industrie	Abax Industrie	Proviron Industries	Proviron Industrie
Composition	solution aqueuse d'acétate de potassium avec inhibiteurs de corrosion	50% minimum d'acétate de potassium	50% minimum de formiate de potassium	50% d'acétate potassium solution aqueuse inhibitor<1%	acétate de sodium solide
Apparence	incolore à jaune	incolore à jaune pale	incolore à jaune pale	incolore à jaune clair, ou bleu sur demande	

Nom commercial	Clearway 1	Clearway F1	Clearway 6S	Clearway SF3
Société	Kemira	Kemira	Kemira	Kemira
Composition	50% min de substance active (acétate de potassium et inhibiteur de corrosion)	formiate de potassium	acétate solide (acide acétique, sel de sodium, sel de potassium)	formiate sodium solide
Apparence	liquide transparent		granulés blanc irréguliers (0,5 à 4mm)	granulés blancs irréguliers (1,5 à 4mm)

Rem.: Les produits à base de chlorures (de sodium ou de calcium notamment) utilisés traditionnellement dans le domaine routier, sont en effet, proscrits sur les chaussées aéronautiques du fait de leur action très corrosive sur les métaux (trains d'atterrissage) [Services hivernaux, 2002].

III.1.3 Additifs contenus dans les produits dégivants et déverglaçants

Les produits formulés contiennent, en plus du produit actif (glycol, acétate, formiate, etc.), des additifs, tels que des agents mouillants, des inhibiteurs de corrosion, des surfactants et des agents épaississants. La nature de ces additifs reste protégée par le secret industriel et

il est difficile de connaître précisément la ou les substances utilisées [Corsi *et al.*, 2006, Corsi *et al.*, 2003]. Ces additifs entrants dans la composition des fondants représentent de 1 à 5% en poids du produit [Mars, 2006].

Les deux familles principales d'additifs identifiées sont les triazoles et les éthoxylates (surfactants) ; les produits les plus utilisés, en quantité, étant les alkylphénol éthoxylates [Corsi *et al.*, 2006, Corsi *et al.*, 2003].

Selon l'enquête réalisée par Staal (2006) auprès des fournisseurs des produits, il semblerait que les inhibiteurs de corrosion utilisés pour les déverglaçants ne soient pas les mêmes que pour les dégivrants, ces derniers au contact direct de l'avion nécessitant des inhibiteurs de corrosion plus puissants. De plus, certains fournisseurs attestent que leurs produits ne contiennent ni triazole, ni nitrite, et sont exempts de nonylphénol éthoxylate ainsi que d'octylphénol éthoxylates. Les inhibiteurs de corrosion qu'ils utiliseraient seraient également utilisés comme additifs alimentaires [Staal, 2006].

III.1.4 Substances retenues pour l'étude

Après la première étape d'enquête auprès des aéroports et l'examen des produits des plus souvent utilisés, la liste des substances à considérer dans le cadre de cette étude a été établie comme suit :

Dégivrants	Déverglaçants	Additifs
Monopropylène glycol	Urée technique	Triazoles
	Acétates de potassium et sodium	Benzotriazoles
	Formiates de potassium et sodium	Nonylphénol éthoxylate
<i>Pour mémoire :</i>		Octylphénol éthoxylate
Ethylène glycol : non	<i>Pour mémoire :</i>	
Frigol : non	Alcool isopropylique : non	

III.2 Caractéristiques physico-chimiques des substances

III.2.1 Dégivrants

Glycols

Les glycols sont des composés organiques appartenant à la classe des alcools. Les alcools sont des molécules polaires dont le point d'ébullition est élevé et qui peuvent être efficacement utilisées pour abaisser le point de congélation d'une solution. Les alcools dont

la chaîne carbonée n'excède pas trois atomes de carbones sont totalement miscibles à l'eau [Switzenbaum *et al.*, 1999].

Propylène glycol

Le propylène glycol est un liquide incolore, visqueux et quasiment inodore. Il est obtenu par hydratation non catalytique de la phase liquide de l'oxyde de propylène à 100-200°C après purification par distillation ou réduction de l'hydroxyacétone [Switzenbaum *et al.*, 1999].

Il n'est pas volatil et présente une haute solubilité dans l'eau. Il est faiblement absorbé par les particules du sol, ce qui lui confère une très grande mobilité dans les strates du sol [Le Déan *et al.*, 1995]. Il est par ailleurs aisément biodégradé dans l'eau ou le sol [Jetoc, 2001].

On ne dispose pas de données relatives à la surveillance de l'air, mais il est fort probable que les concentrations en propylène glycol dans l'atmosphère soient extrêmement basses en raison de sa faible pression de vaporisation et de sa solubilité dans l'eau élevée [Jetoc, 2001].

III.2.2 Déverglaçants

Urée technique

L'urée est un amide, de formule brute H_2NCONH_2 , obtenu par réaction entre l'ammoniac (NH_3) et le dioxyde de carbone (CO_2) sous hautes pression et température [Le Déan *et al.*, 1995]. C'est un composé azoté non corrosif et non toxique pour l'homme [Services hivernaux, 2002, Valcin, 1999]. La toxicité de l'urée en elle-même est en effet faible mais l'azote présent dans la molécule (46%) est à l'origine d'une demande en oxygène importante. Son processus de biodégradation se caractérise de plus par la production d'ammoniac (NH_3) dont la toxicité est nettement plus élevée provoquant un impact négatif sur l'environnement et notamment sur les milieux aquatiques [Thirionet et Gregeois, 2000, Valcin, 1999].

Acétates

Les acétates sont des produits ayant une solubilité et une biodégradabilité très élevées [Branchu, 2001, Fournier, 2001]. L'ion acétate ($C_2H_3O_2^-$) est en effet rapidement biodégradé en dioxyde de carbone et en eau avec une demande d'oxygène minimale. Cette biodégradation peut se produire même à des températures voisines de 0°C [Valcin, 1999].

L'acétate de potassium se présente sous la forme de cristaux incolores, de poudre blanche cristalline ou de flocons. Il forme au contact de l'eau une solution alcaline [Switzenbaum *et al.*, 1999].

Formiates

Les ions formiates (CH_2O_2^-) possèdent des propriétés similaires à celles des ions acétates. Leur dégradation se produirait en revanche à un rythme supérieur à celles des acétates [Valcin, 1999].

III.2.3 Additifs

Benzotriazoles

Les benzotriazoles sont des additifs utilisés comme inhibiteurs de corrosion et retardateurs de flamme notamment pour les composants métalliques traversés par des courants électriques. La forme la plus utilisée est le méthyl benzène triazole également dénommée tolytriazole. C'est est un acide organique faible.

Aucun cas de biodégradation n'a été démontré pour ce type de substances ; les expériences de phytoremédiation s'appuient essentiellement sur des phénomènes d'évapotranspiration par les plantes [Breedveld *et al.*, 2002]

Alkylphénols

De façon générale, les alkylphénols (AP) sont fabriqués en grandes quantités et servent d'intermédiaires dans la fabrication des agents tensioactifs, des résines phénoliques, etc. Ils se forment également lors de la dégradation des alkylphénols éthoxylés (APEO). Il n'y a pas d'exemple de la synthèse naturelle des AP et APEO. Leur présence dans les milieux aquatiques est donc uniquement anthropogénique [Becue et Nguyen, 2004].

La nomenclature des alkylphénols est assez complexe et source de nombreuses confusions. Le tableau repris en annexe 1, rédigé par l'INERIS, présente les principaux AP produits ou retrouvés dans l'environnement.

Nonylphénols et octylphénols

Le terme nonylphénols (NP) recouvre un grand nombre d'isomères différents, de formule $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{C}_9\text{H}_{19}$. Ils appartiennent à la famille des alkylphénols. Les NP se présentent sous

forme d'un liquide visqueux jaune pâle et dégagent une légère odeur phénolique [Brignon, 2005].

Le 4-nonylphénol (mélange de nonylphénols à chaîne ramifiée substitués en position 4 sur le noyau) représente la grande majorité des nonylphénols (80%) dans les mélanges techniques commerciaux [Becue et Nguyen, 2004].

Le terme octylphénol désigne uniquement le 4-tert-octylphénol. Pour les octylphénols (OP), seul cet isomère intervient en usage industriel.

Ethoxylates de nonylphénols

La plus grande partie des NP est utilisée pour produire des éthoxylates de nonylphénols (NPEO) (substances solides), qui sont ensuite incorporés dans des formulations industrielles. Les NPEO sont des produits aux propriétés dispersantes, émulsifiantes et mouillantes, qui les rendent utiles, en combinaison avec d'autres produits, au sein de formulations commerciales et notamment dans les fondants chimiques. Ils ont ainsi été mis en évidence dans des produits de dégivrage des avions aux Etats-Unis [Britt, 2003] et pourraient également être présents en Europe. La tendance actuelle choisie par industrie serait cependant, en règle quasi-générale, de chercher à substituer ces produits.

Les NPEO ne sont pas stables dans l'environnement et sont rapidement dégradés en nonylphénols [Brignon, 2005].

IV. Impacts sur l'environnement

IV.1 Considérations générales

L'utilisation des produits dégivrants et déverglaçants sur les zones aéroportuaires est soumise à plusieurs exigences quelles soient dictées par les constructeurs aéronautiques, les organismes nationaux ou internationaux d'associations de professionnels ou par les spécifications techniques nationales et notamment militaires [Services hivernaux, 2002]. Parmi celles-ci figurent l'innocuité du produit vis-à-vis de l'environnement (en terme de biodégradabilité) et la non toxicité du produit pour le milieu vivant (faune et microfaune aquatique).

Cependant, la diversité des produits (et de leurs noms commerciaux) rend difficile l'identification de leurs impacts sur l'environnement et la santé. Les données relatives à ces aspects manquent parfois aux fiches techniques d'utilisation et sont jugées moins importantes au regard des performances et de l'efficacité du produit [Services hivernaux, 2002].

IV.1.1 Quels transferts, vers quels milieux

Notion de transport des polluants

Le transport des polluants définit leur changement de lieu dans l'environnement. On parle aussi de dispersion (également souvent appelée *mobilité*) et on entend par là la tendance des produits chimiques à s'étendre dans d'autres domaines de l'environnement depuis l'endroit où ils ont été appliqués ou utilisés pour la première fois. Il s'agit donc de la capacité d'une substance à parvenir à d'autres endroits, où elle déploiera éventuellement ses effets ou sera transformée [Bliefert et Perraud, 2001].

La distance jusqu'à laquelle les substances sont transportées dépend de leurs propriétés physiques et de leur stabilité chimique. La rapidité du transport aura également une influence sur la distance, les polluants étant transportés avant tout par l'atmosphère et le cycle de l'eau. A noter que le sol n'a pas de fonction de transport.

Dégivrage des avions

Le dégivrage consiste le plus généralement en la pulvérisation du produit dégivrant sur les surfaces concernées. Pour les produits liquides (type I), la part de la solution pulvérisée adhérant aussitôt à la surface de l'avion est estimée à 50% ; on estime à 75 à 80% la

quantité de produit se retrouvant ensuite sur la chaussée, pulvérisé directement sur le sol ou s'écoulant depuis l'avion. Les 15 à 20% de dégivrant qui restent sur l'appareil glissent lors du roulage et du décollage ; les produits se dispersent alors et se déposent sur les terrains environnants. La quasi-totalité de la solution vaporisée, en dehors des pertes par évaporation, se retrouve donc sur la piste et ses accotements. Les quantités polluantes ainsi accumulées sur les surfaces imperméabilisées sont ensuite entraînées par les eaux de pluies vers les réseaux de collectes des eaux pluviales lorsqu'ils existent sur le site [Corsi *et al.*, 2006, Mericas, 2006, Thirionet et Gregeois, 2000, Switzenbaum *et al.*, 1999, Le Déan *et al.*, 1995].

Cependant, hormis quelques grosses infrastructures aéroportuaires qui ont su se mettre en conformité avec la réglementation française en matière de protection durable de la ressource en eau, près de la moitié des gestionnaires consultés par le STAC en 2006 indique qu'aucun dispositif n'est mis en place afin d'assurer la gestion des produits de dégivrage et de déverglaçage. Les fondants utilisés en période hivernale rejoignent par conséquent directement les milieux naturels sans qu'aucune récupération préalable ni aucun traitement ne soit mis en œuvre par le gestionnaire [Mars, 2006].

Dans le cas des produits épaissis (dégivrants de type IV), la récupération sur la piste est de toute façon plus difficile car, plus visqueux, ils adhèrent à l'avion jusqu'au décollage pour ne s'écouler de l'appareil qu'une fois devenus liquides. Ce qui conduit à une plus grande dispersion des produits dans l'environnement [Staal, 2006].

Déverglaçage des aires aéronautiques

Concernant le déverglaçage des aires aéronautiques, les produits sont épandus directement sur les surfaces imperméabilisées. Le devenir des produits dans l'environnement dépend ainsi du type de produit utilisé, des pratiques d'épandage (souvent hétérogènes d'un site à l'autre), des lieux d'épandage, mais aussi et surtout de la gestion des eaux pluviales sur la plate-forme. Concernant les pistes, généralement non assainies, l'impact se situe au niveau du sol des accotements. Il faut alors s'intéresser à la nature du sol, aux quantités infiltrées, à la profondeur de la nappe, etc. Pour les taxiways et parking, possédant généralement un système d'assainissement, les produits rejoignent le réseau pluvial de l'aéroport soit directement, soit quelques temps après lorsque la température redevient positive et/ou quand il pleut [Services hivernaux, 2002].

Selon les cas et les systèmes de récupération des eaux mis en place, les milieux récepteurs peuvent donc être le sol, les eaux de surfaces (lagunes ou cours d'eau) et/ou les eaux souterraines lorsque des bassins d'infiltration ont été installés sur les sites [Mouchel, 2002, GAO, 2000].

IV.1.2 Quels impacts sur les milieu récepteurs

On distingue généralement deux types d'impacts vis-à-vis des milieux récepteurs [Thirionet et Gregeois, 2000, Le Déan *et al.*, 1995] :

1. Les impacts à court terme, qui se caractérisent par leur absence de rémanence à longue échéance et par une cessation de leurs effets dès que l'alimentation en polluant est arrêtée,
2. Les impacts à long terme représentés par les effets occasionnés par les produits susceptibles de s'accumuler dans la faune, la flore et les sédiments comme les métaux par exemple. Ces impacts perturbent l'écosystème dans ses équilibres complexes en se traduisant par des modifications de la composition des populations animales et végétales. L'importance de l'impact résulte de la répétition des événements et la rémanence des polluants.

Des quantités importantes de ces produits sont utilisés en France et à travers le monde et rejetés avec les eaux de ruissellement dans l'environnement. Ces produits peuvent alors porter atteintes à la qualité des eaux de surface mais aussi des nappes phréatiques. Après épandage des produits dégivrants et déverglaçants, les eaux de ruissellement sont en effet susceptibles d'entraîner de fortes quantités de matières dégradables [Corsi *et al.*, 2006, Corsi *et al.*, 2003, Mouchel, 2002, Branchu, 2001, Fournier, 2001].

Dans le cas des produits utilisés en viabilité hivernale et considérés dans notre étude (glycols, urée, acétates et formiates), les principales conséquences sur l'environnement peuvent les suivantes :

1. un apport excessif de nutriments pouvant causer une eutrophisation du milieu récepteur (pour l'urée essentiellement),
2. une augmentation des concentrations en carbone et azote provoquant des modifications du rapport C/N du milieu,
3. un risque de désoxygénation de l'écosystème récepteur, suite à une métabolisation trop intense des molécules fortement biodégradables qui constituent l'essentiel de ces produits,

4. un risque toxique lié à la composition des produits (présence d'additifs notamment) même si les données écotoxicologiques révèlent des seuils de toxicité relativement hauts, nettement supérieurs aux concentrations généralement observées actuellement dans les eaux de ruissellement des aéroports.

Eutrophisation

Une fois rejetés dans les milieux aquatiques, les produits à base d'azote notamment constituent une source de matières nutritives très importante pour les végétaux. La prolifération de ces matières nutritives dans l'eau provoque une explosion d'algues dont la décomposition surconsomme l'oxygène et entraîne la mort du milieu aquatique par eutrophisation [CNRS, 2006].

Rapport C/N

Les microbiologistes de l'environnement ont montré que les substrats à fort rapport C/N (concentration en carbone / concentration en azote) favorisaient des rendements de croissance des microorganismes faibles. D'un point de vue de la mécanique de dégradation des produits, lorsque les quantités d'azote sont faibles par rapport aux quantités de carbone, les bactéries, ayant une consommation C/N fixée par leur métabolisme interne, ne peuvent utiliser tout le carbone pour leur croissance et le rejettent, d'où des rendements de croissance faibles. Ainsi lorsque l'on manque d'azote par rapport au carbone, le rendement de croissance moyen est faible et la biodégradation des produits limitée. A l'inverse un apport excessif d'azote devient toxique pour les microorganismes [Mouchel, 2002].

Désoxygénation du milieu

La dégradation de ces produits contribuera à les éliminer du milieu récepteur, mais elle pourra également générer de fortes désoxygénations tout à fait nuisibles. En effet, les concentrations de DCO (Demande Chimique en Oxygène) mesurées dans les eaux de ruissellement aéroportuaires après les périodes d'épandage dépassent fréquemment et très largement des teneurs de 100 mg/l en une DCO particulièrement dégradable [Mericas, 2006, Mouchel, 2002, Branchu, 2001, Corsi *et al.*, 2001]. La DCO et la DBO (Demande biologique en oxygène) sont des indicateurs de la consommation d'oxygène nécessaire à l'oxydation ou la dégradation des substances oxydables dans les eaux par voie chimique ou biologique. Elles traduisent une forme de pollution organique.

Tout composé carboné se dégrade en présence d'oxygène, il s'agit d'un processus à la fois chimique et biologique. La dégradabilité correspond au potentiel qu'a une substance à se dégrader, c'est à dire à se décomposer en molécules possédant un nombre moins grand d'atome de carbone. Le processus de dégradation d'un produit dépend de différents facteurs liés à la fois à la nature chimique du produit et aux caractéristiques du milieu (température, teneur en oxygène, en bactéries, en éléments nutritifs pour ces bactéries, etc.). S'il est important pour l'environnement que les substances épandues soient biodégradables (afin qu'elles ne s'accumulent pas dans les milieux), la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation ne doit pas être trop élevée sous peine de provoquer une asphyxie du milieu aquatique (notamment) se traduisant par la mort de la flore et la faune y vivant [CNRS, 2006, Corsi *et al.*, 2001].

IV.1.3 Quelles charges dans les eaux de ruissellement

D'après les études menées de 1995 à 1998 par le Lcpc sur les sites de Marseille-Provence, Nantes-Atlantique et Lyon-Satolas, il apparaît que les eaux de ruissellement des aéroports sont faiblement polluées, et notamment en ce qui concerne la DCO. Les charges de pollution transportées mesurées lors du suivi, dans chacun des cas, d'une vingtaine d'événements pluvieux et variant en charge annuelle de 130 à 365 kg O₂/ha, sont ainsi considérées comme faibles comparées à celle mesurée sur une autoroute (autoroute A11, chaussée à 2 voies, 10 000 véh/j, 420 kg O₂/ha) [Branchu, 2001, Thirionet *et al.*, 1999, Legret *et al.*, 1995-1998]. Dans la mesure où ce paramètre peut être représentatif de la concentration en fondants chimiques (non mesurée directement), des glycols comme des acétates, il peut être conclu que la pollution des eaux recueillies due à ces produits est faible. Les teneurs en DCO sont comparables sur les deux sites aéroportuaires de Marseille et Lyon, et bien que supérieures à celles obtenues à Nantes, elles restent inférieures à celles mesurées sur une autoroute [Legret *et al.*, 1995-1998].

Dans le cas de l'aéroport de Lesquin, dont la qualité des eaux de ruissellement a été étudiée en 2001, il a été montré que l'origine des fortes concentrations ponctuelles mesurées en DCO et COT (250 à 2000 mg/l) était directement liée aux opérations d'épandage d'acétate de potassium mais également à des pollutions accidentelles dont les parts respectives sont difficiles à déterminer selon le protocole utilisé alors. Le suivi des eaux de ruissellement a également montré l'absence d'acétate sur la piste après opérations hivernales, ce qui confirme la très bonne solubilité du produit, entièrement lessivé par la pluie [Branchu, 2001]. Le suivi pluviométrique et débitmétrique des eaux de l'aéroport a également mis en évidence la grande variabilité des flux engendrés par les épandages et donc des charges organiques

exportées par le réseau d'assainissement en fonction du caractère pluvieux ou non de la période [Branchu, 2001].

Les niveaux de pollution des eaux pluviales parfois importants et de grande variabilité à proximité des sites de dégivrage/déverglaçage, décroissent rapidement sous le double effet de la dilution et de l'oxydation [Services hivernaux, 2002].

IV.2 Impacts des dégivrants sur l'environnement

IV.2.1 Les glycols

Impacts sur les eaux

La toxicité des glycols (éthylènes et propylènes) est très basse, aussi bien dans les eaux douces que salées. Ces produits ne sont pas considérés comme bio accumulatifs dans les eaux et les sols, et présentent un haut degré de biodégradabilité dans des conditions normales ; ils sont ainsi classés dans la catégorie d'éléments non rémanents dans l'environnement [Corsi *et al.*, 2001, Le Déan *et al.*, 1995]. Quatre études ont indiqué une biodégradation supérieure à 60 % dans l'eau en 10 jours [Jetoc, 2001].

Si le propylène glycol n'est pas intensément toxique pour les organismes aquatiques d'eau douce, excepté à des concentrations très importantes où il peut causer des dommages au tissu des branchies [Fournier, 2001, Jetoc, 2001], sa biodégradabilité est cependant un problème majeur dans la mesure où ce produit présente une DBO très élevée et peut donc, potentiellement, épuiser les réserves en oxygène des eaux qui reçoivent les effluents d'eaux pluviales [Mericas, 2006, Corsi *et al.*, 2003, Corsi *et al.*, 2001].

En effet, comme tous les composés organiques, ils se dégradent par deux mécanismes parallèles : une oxydation chimique, par contact du produit avec l'oxygène de l'air ou l'oxygène dissous dans les eaux pluviales, et une biodégradation faisant intervenir le métabolisme du vivant (végétaux et/ou bactéries). En conditions d'oxygène suffisantes, il se produit une oxydation des glycols accompagnée d'une perte d'hydrogène et un raccourcissement de la chaîne carbonée. Le produit final de la dégradation est le CO₂. Par contre si le taux d'O₂ dissous est insuffisant, les composés organiques sont réduits se traduisant par une perte d'oxygène et une diminution de la chaîne carbonée ; les produits de dégradation sont alors des alcools [Fournier, 2001].

La décomposition de la matière organique peut réduire de façon significative les concentrations en oxygène dissous de l'eau et provoquer l'apparition de perturbations de l'équilibre du milieu si le taux de décomposition est plus important que le taux d'aération.

On estime qu'une solution à 50% de glycol présenterait une DBO₅ de 430 mg/l et le propylène glycol, une DBO₅ plus élevée de 1000 mg/l environ [Mericas, 2006, Le Déan *et al.*, 1995]. La charge en DBO augmente avec la température, s'il y a dégel rapide (deux jours), celle-ci peut être équivalente à la charge en DBO domestique journalière d'une ville d'une population d'un million d'habitants (charge du dégivrage d'un avion seul ; on ne tient pas compte de celui des pistes) [Le Déan *et al.*, 1995].

Impacts sur le sol

Une étude en laboratoire citée par Fournier (2001) a mis en évidence un certain nombre de paramètres favorisant la dégradation du propylène glycol dans les sols. Il est apparu que la biodégradation du glycol suit une cinétique d'ordre 1 (c'est-à-dire que la vitesse de disparition du produit peut être représentée par une équation du premier ordre), et que l'aération, l'amendement du sol en chaux et en microorganismes augmentent très sensiblement le coefficient de base, accélérant d'autant la disparition du produit dans le milieu.

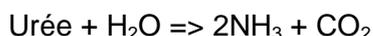
Impacts sur les végétaux

Plusieurs études ont montré que la majorité des plantes et les populations microbiennes sont peu affectées par les hautes teneurs en glycol : elles s'adaptent bien à des concentrations en glycol de l'ordre de 600 à 1200 mg/l. Néanmoins, si ces produits ne sont que très faiblement toxiques pour les végétaux, ils ont tendance à augmenter la perméabilité des feuilles des plantes, notamment aquatiques, en augmentant les espaces intercellulaires ; ce phénomène pouvant ainsi accroître la toxicité des autres produits en facilitant leur adsorption [Fournier, 2001].

IV.3 Impacts des déverglaçants sur l'environnement

IV.3.1 Les produits azotés

Lors de son processus de biodégradabilité, l'urée est hydrolysée en NH_3 et CO_2 , sous l'action d'une enzyme, l'uréase, selon la réaction :



Cette réaction dépend de plusieurs paramètres, dont la température, mais peut néanmoins avoir lieu en période hivernale à condition que l'uréase ou les micro-organismes la possédant soient présents dans le milieu. Cette dégradation biologique de l'urée est ainsi accélérée dans le sol ; si la substance reste dans les eaux de ruissellement, sa dégradation restera partielle [Le Déan *et al.*, 1995].

De part leur formulation contenant de l'azote, les produits tels que l'urée technique, une fois rejetés dans les milieux aquatiques, constituent une source de matières nutritives très importante pour les végétaux. La prolifération de ces matières nutritives dans l'eau provoque une explosion d'algues dont la décomposition surconsomme l'oxygène et entraîne la mort du milieu aquatique par eutrophisation [Valcin, 1999].

L'urée ne contribue cependant pas significativement à la DBO, mais contribuerait davantage à la DNO^3 présente dans les eaux de ruissellement des aéroports. Les organismes nitrifiants à l'origine des réactions biochimiques des différentes formes d'azote utilisent l'oxygène dissous de l'eau et le CO_2 ou HCO_3^- comme source de carbone, modifiant le rapport C/N du milieu [Le Déan *et al.*, 1995]. Ces réactions contribuent donc à la diminution de l'oxygène dissous de l'eau préjudiciable à la vie aquatique.

Si l'impact de l'urée en elle-même est très faible, la toxicité de l'ammoniac (NH_3) pour la vie aquatique est par conséquent relativement importante et d'autant plus que le pH et la température sont élevés.

IV.3.2 Les acétates et les formiates

Impacts sur les eaux

En règle générale, on ne remarque l'influence des composés des déverglaçants (Na, K) sur les biocénoses aquatiques qu'à partir de quelques grammes par litre. Cela n'est pas étonnant puisque tous les organismes vivants ont besoin de ces éléments pour vivre. Ainsi,

³ DNO : demande en oxygène créée par l'oxydation de l'ammoniac (NH_3) présent dans la matière organique.

dans les concentrations dans lesquelles sont rejetés ces ions en provenance des opérations de déverglaçage, on peut vraisemblablement exclure qu'une surcharge porte atteinte à la faune et à la flore aquatiques, même sous leur forme les plus sensibles [Cete de l'Est, 2005].

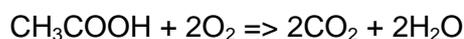
Impacts sur le sol

Lors d'un apport en sodium (acétate ou formiate), des processus d'échange auxquels participent les ions Na⁺ modifient le pH. En pénétrant sous forme de solutions, ces ions ont un impact sur la structure du sol; ils remplacent les ions Ca, K, et Mg inclus dans la structure du sol, le pH augmente et il s'ensuit un colmatage par les particules fines et ainsi un compactage du sol [Cete de l'Est, 2005, Valcin, 1999].

Ces effets sont susceptibles de se produire essentiellement aux abords de la zone aéroportuaire où sont générés les produits déverglaçants, et principalement dans la couche superficielle du sol.

L'accumulation des ions sodium dépend largement de la granulométrie des sols. Les sols argilo-limoneux retiendront préférentiellement le sodium sur les particules argileuses ; en revanche, pour les sols sablonneux, comprenant peu d'éléments fins, l'accumulation sera faible, voire imperceptible [Cete de l'Est, 2005, Valcin, 1999].

Les acétates quand à eux sont minéralisés en conditions aérobies par les microorganismes dans la frange capillaire du sol selon :



Les sols ont donc les moyens de dégrader les acétates avant que le produit n'atteigne la nappe, réduisant ainsi la demande en oxygène dans l'eau [Fournier, 2001].

Impacts sur les végétaux

Les modifications des propriétés physiques et chimiques du sol influent sur la végétation. Lors du compactage du sol sous l'action des ions sodium, les pores du sol s'effondrent, la teneur en air et la perméabilité à l'eau s'affaiblissent gênant la respiration des plantes par les racines. Là où les racines des arbres se développent, l'adsorption des ions sodium libèrent des ions nutritifs (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, etc.) qui, emportés par les eaux d'infiltration dans des couches plus profondes, ne sont plus accessibles aux plantes.

De leur côté, les ions sodium puisés dans les particules du sol sont remplacés par les ions hydrogène disponibles dans l'eau du sol, ce qui augmente le pH de ce dernier. Les conditions alcalines, elles, font que le sol contient moins d'éléments nutritifs vitaux (manganèse, fer, zinc et bore) en réserve pour les plantes [Cete de l'Est, 2005, Valcin, 1999].

Outre l'influence des conditions du sol qui modifient les possibilités d'approvisionnement en eau et en substances nutritives pour les plantes, il est fort possible que les impacts des composés déverglaçants sur les végétaux dépendent du rythme et de la période d'application, de la zone touchée (feuilles, racines) tout comme du type de végétal et de la vitalité des plantes influençant eux-mêmes la sensibilité et le degré de résistance à ces produits, mais peu d'études ont jusqu'à présent porté spécifiquement sur ces composés utilisés en zones aéroportuaires.

Citons uniquement une étude présentée par Fournier (2001) qui, concernant la phytotoxicité d'un produit commercial à base d'acétates, a indiqué qu'aux faibles concentrations (<2 g/kg sol), il jouait le rôle de fertilisant, par contre, à partir de 4 g/kg sol, on observait une diminution de la biomasse végétale.

Acétate de sodium

Les acétates et les formiates présentent l'avantage de ne contenir ni ammoniac, ni nitrites ou nitrates [Corsi *et al*, 2001]. L'acétate de sodium de formule brute NaCHO_2 est ainsi moins toxique pour les espèces aquatiques que le NH_3 provenant de la dégradation de l'urée. Sa DBO est 10 fois plus faible que celle de l'urée et il ne contribue pas au phénomène d'eutrophisation. Les aspects négatifs de l'utilisation de ce produit résident dans la présence des ions sodium. Le problème de toxicité de ces ions se pose dès lors qu'ils sont apportés en excès au milieu [Le Déan *et al.*, 1995].

Acétate de potassium

Il est très facilement biodégradable [Mouchel, 2002] ; sa dégradation demande en effet un taux de DBO_5 plus bas que celle des glycols avec 0,27 mg O_2/l contre 0,83 mg O_2/l pour le propylène glycol, même si elle est plus consommatrice d'oxygène que celle des ions formiates [Valcin, 1999]. L'acétate de potassium est de plus considéré comme moins agressif vis-à-vis de l'environnement [Le Déan *et al.*, 1995].

La dégradation de l'acétate a été étudiée à plusieurs reprises sous différentes conditions expérimentales. Diverses expériences ont ainsi mis en évidence l'importance des facteurs tels que la présence de bactéries dans le milieu, l'oxygénation et la température, la teneur en éléments nutritifs (azote et phosphore) permettant la croissance des bactéries, etc. [Mouchel, 2002, Fournier, 2001].

En conditions optimales de ces paramètres, il apparaît que les concentrations en acétate généralement rencontrées dans les eaux de ruissellement des aéroports sont quasiment

dégradées en moins de 2 jours [Services hivernaux, 2002]. Si cette durée semble tout à fait acceptable d'un point de vue environnemental, il faut préciser qu'elle est obtenue lors d'expériences en laboratoire, dans des réacteurs thermostatés, grâce à une dégradation à 20°C et des teneurs en azote et phosphore minimales respectivement comprises entre 5 et 10 mg/l et 0,3 et 0,5 mg/l, conditions très rarement rencontrées en période hivernale...

L'ion acétate ($C_2H_3O_2^-$) reste cependant rapidement biodégradé en dioxyde de carbone et en eau avec une demande d'oxygène minimale. Cette biodégradation peut se produire même à des températures voisines de 0°C : il est donc peu probable que les concentrations d'acétate s'accumulent au cours de l'hiver. A 10°C, deux semaines sont nécessaires pour une biodégradation totale, tandis qu'à 2°C, il faut compter entre deux et quatre semaines [Valcin, 1999].

On remarque donc, que parmi les paramètres testés, une faible température ralentit le processus de dégradation. L'influence de la quantité de biomasse initiale est en revanche relative, et les teneurs en nitrates et phosphates possèdent par contre un impact très important sur les cinétiques de dégradation : des seuils apparaissent, à partir desquels le produit testé ne se dégrade que très lentement [Corsi *et al.*, 2003, Fournier, 2001].

Formiate de sodium

Ce composé est souvent comparé au chlorure de sodium (NaCl) dans sa rapidité d'action, les quantités nécessaires à appliquer et les températures requises. Il présente une DBO équivalent au 1/10 de celle de l'urée, soit 0,23 g O_2 /g formiate de sodium. D'un point de vue environnemental, il pose essentiellement le problème de la toxicité des ions sodium.

Formiate de potassium

L'acétate et le formiate de potassium ont du fait de leur formule chimique et de leur qualités physico-chimiques un comportement différent vis à vis de l'environnement. Le calcul de leur DCO théoriques notamment donne 0,57 g O_2 /g d'acétate de potassium et 0,19 g O_2 /g de formiate de potassium, soit une consommation d'oxygène théorique trois fois plus faible pour le formiate ; ce résultat conférant donc a priori, à concentration égale, un caractère moins polluant au formiate de potassium par rapport à l'acétate de potassium [Hureaux, 1997].

IV.4 Impacts des additifs sur l'environnement

IV.4.1 Les triazoles

Le devenir des additifs dans l'environnement est encore peu connu [Breedveld *et al.*, 2003, Breedveld *et al.*, 2002]. Une étude menée sur un ancien aéroport a montré la persistance des benzotriazoles dans les sols à des concentrations variables (de 0,33 à 13 mg/kg) sur le site deux ans après la fin de toute activité de dégivrage. Des tests écotoxicologiques complémentaires réalisés sur les eaux n'ont pas mis en évidence de toxicité particulière mais a souligné une diminution du phénomène de nitrification en relation avec des concentrations élevées en benzotriazoles.

Ces composants sont par ailleurs très mobiles et peu absorbés dans les sols. Leur persistance dans les milieux eau et sol peut être attribuée à leur non dégradation par les micro-organismes [Breedveld *et al.*, 2003, Breedveld *et al.*, 2002].

Plusieurs études américaines ont réussi à isoler certains de ces composants (benzotriazole et tolytriazole) et ont montré que ces derniers étaient beaucoup plus toxiques que les produits chimiques de base [Corsi *et al.*, 2003, Corsi *et al.*, 2001, Cancilla *et al.*, 1997].

De façon plus générale, alors que, par exemple, la toxicité des glycols vis à vis de la faune aquatique ne s'exprime qu'à de très fortes concentrations, des essais comparatifs portant sur différents organismes aquatiques ont fourni des valeurs de CL50 (concentration létale) jusqu'à 10 fois plus élevées pour les produits purs (glycols) que pour les formulations complètes comprenant des additifs [Corsi *et al.*, 2003]. Ainsi, même si leur proportion reste faible dans le produit commercialisé (en général autour de 1%) [Services hivernaux, 2002], certains produits dégivrants sont apparus plus toxiques vis à vis de la microfaune aquatique que les composés purs [Corsi *et al.*, 2006, Mericas, 2006, Corsi *et al.*, 2003, Corsi *et al.*, 2001, Fournier, 2001].

IV.4.2 Les alkyphénols

De façon générale, les alkyphénols (AP) sont ubiquitaires dans l'environnement de par leur large spectre d'utilisation industrielle (produits phytosanitaires, industrie électrique, industrie textile, production de papier, etc.) et l'absence de traitement approprié dans les stations d'épuration. On estime en effet que 65% des alkyphénols et dérivés entrant dans les stations d'épuration sont rejetés dans l'environnement. La présence d'alkylphénols a été détectée dans l'air, l'eau, les sédiments et le sol [Becue et Nguyen, 2004].

Accumulation en milieu aquatique

Leurs caractéristiques physico-chimiques favorisent l'accumulation préférentielle des nonylphénols et des octylphénols dans les boues et les sédiments. La demi-vie du 4-nonylphénol dans les sédiments est de 28 à 104 jours. Selon les résultats de l'étude réalisée par Isobe *et al.* [2001], 20% des nonylphénols sont retrouvés au sein du milieu aquatique, dans la phase particulaire et 80% dans l'eau elle-même. L'adsorption des AP sur les matières en suspension joue un rôle important dans le devenir environnemental de ces composés dans les milieux aquatiques [Becue et Nguyen, 2004].

Processus de dégradation

L'une des principales sources d'AP est la biodégradation des alkylphénols éthoxylés (APEO), notamment utilisés comme adjuvants de formulation de pesticides et autres produits agricoles, mais aussi comme additifs dans les fondants chimiques. Parmi ceux-ci, les nonylphénols éthoxylés (NPEO) subissent un processus de biodégradation complexe. En condition aérobie, ce processus biologique conduit à la formation de nonylphénol et d'éthoxylates de degré inférieur. En condition anaérobie, les NPEO sont biotransformés en acides et en nonylphénol [Becue et Nguyen, 2004]. La biodégradation des octylphénols éthoxylés est similaire à celle des NPEO.

Les alkylphénols éthoxylés (éthoxylates d'alkylphénols) se dégraderaient ainsi facilement et rapidement (principalement en milieu anaérobie) [ILN, 2005, Corsi *et al.*, 2003] contrairement à leurs produits de dégradation, les alkylphénols, qui seraient plus persistants, plus toxiques, plus lipophiles et moins hydrosolubles [Becue et Nguyen, 2004].

Toxicité

Ces produits (alkylphénols) font actuellement l'objet d'études de toxicité en milieu aquatique car ils sont suspectés de modifier significativement les processus de reproduction et de croissance des organismes vivants [ILN, 2005, Corsi *et al.*, 2003]. Une bioconcentration des AP a été en effet constatée au sein de plusieurs espèces aquatiques (algues, plantes, poissons, moules) [Becue et Nguyen, 2004].

L'évaluation des risques effectuée par l'Union Européenne pour les nonylphénols (NP) à la fin des années 1990 a conclu à la présence de risques significatifs pour l'environnement aquatique, les sols et pour les organismes supérieurs par empoisonnement secondaire (accumulation des NP dans la chaîne alimentaire). Du fait de cette toxicité démontrée, une volonté de réduction et de régulation des NPEO a été mise en place en Europe et en

Amérique du Nord depuis quelques années. Les NP ont ainsi été classés dans le cadre de la Directive Eau comme « substance dangereuse prioritaire », de telle sorte qu'une action de prévention de ses rejets dans l'eau sur 20 ans soit requise dans les pays membres [Becue et Nguyen, 2004]. A la suite de leur inscription comme substance dangereuse prioritaire, les nonylphénols et les éthoxylates de nonylphénols ont fait l'objet d'une interdiction d'emploi et de mise sur le marché pour un certains nombres d'usages industriels (Directive 2003/53/CE du 18 juin 2003).

D'autres études en cours portent sur les mécanismes de transport et de dégradation de ces produits, visant à mettre en évidence des différences entre le devenir dans l'environnement des composants de base et celui des additifs contenus dans les produits dégivrants et déverglaçants [Corsi *et al.*, 2006, ILN, 2005].

V. Impacts sur l'homme

V.1 Impacts des dégivrants sur la santé humaine

V.1.1 Les glycols

Le propylène glycol est moins toxique que son confrère l'éthylène glycol, mais il peut cependant causer des éruptions cutanées et des irritations s'il se trouve en contact prolongé avec la peau [Le Déan *et al.*, 1995]. Il est ainsi considéré comme non irritant pour la peau dans des conditions normales d'utilisation, et modérément irritant pour les yeux [Fieandt, 2005, Thomas *et al.*, 2003, Jetoc, 2001]. Des études menées sur les animaux affirment que des expositions répétées de rats au propylène glycol dans leur eau potable (jusqu'à 10 %) ou leur alimentation (jusqu'à 5 %) n'a pas eu d'effets nuisibles, sur des périodes allant jusqu'à deux ans [Thomas *et al.*, 2003, Jetoc, 2001]. Le produit n'a pas causé de toxicité foétale ou développementale chez les rats, souris, lapins ou hamsters, ni d'effet reproducteur. Aucun effet cancérigène ou mutagène dû au propylène glycol n'a de plus été observé lors d'essais in vivo et in vitro sur les animaux [Thomas *et al.*, 2003, Jetoc, 2001, STBA, 2000].

Plusieurs études ont par ailleurs montré qu'il n'existait aucune différence majeure entre la toxicité du propylène glycol qu'il s'agisse d'animaux ou d'hommes. Les effets toxiques du produit n'apparaissent dans les deux cas qu'à très fortes doses [Thomas *et al.*, 2003]

V.2 Impacts des déverglaçants sur la santé humaine

V.2.1 Les produits azotés

La toxicité et plus généralement l'impact sur la vie terrestre et aquatique de l'urée en elle-même est très faible. Cependant, la formation de NH_3 et de NO_3^- présente un risque pour l'environnement et la santé de l'homme [Mericas, 2006, Le Déan *et al.*, 1995].

Les nitrates, produits de la dégradation de l'urée, se transformant, de plus, en nitrites peuvent en effet présenter des dangers pour la santé des nourrissons et des fœtus [CNRS, 2006, Bliefert et Perraud, 2001].

Au-delà d'un certain seuil de concentration, les nitrates engendrent, chez les enfants et surtout les nourrissons très sensibles à une absorption trop importante, un empoisonnement du sang appelé une méthémoglobinémie, ou encore maladie bleue. Les nitrates ne sont pas

nocifs en eux-mêmes pour la santé. Mais sous l'action d'une bactérie présente dans le corps humain, ils se transforment en nitrites. Ceux-ci oxydent l'hémoglobine du sang qui ne peut plus fixer l'oxygène ce qui perturbe la respiration cellulaire. Même à faible concentration, ils peuvent également provoquer à long terme des cancers chez les adultes lorsqu'ils sont associés à certains pesticides avec lesquels ils forment des composés cancérigènes [CNRS, 2006].

V.2.2 L'acétate de potassium

L'acétate de potassium présente une légère toxicité par voie orale pour les rats [Fischel, 2001]. Chez l'homme, l'inhalation de cette substance peut causer une irritation du nez, de la gorge et des voies respiratoires. Il peut également provoquer de légères irritations de la peau, des yeux et du système digestif.

Les effets de l'acétate de potassium sur les jeunes enfants ou les adultes présentant une insuffisance rénale ou cardiaque concernent les irritations et inflammation de l'estomac, les faiblesses musculaires, brûlures, tremblements et engourdissements des membres, un ralentissement du rythme cardiaque, et une diminution de la pression artérielle. Ces effets sont attribués par les experts au potassium [Fischel, 2001].

V.2.3 Les formiates

Très peu d'études et/ou références sont apparemment disponibles concernant les effets et l'éventuelle toxicité des formiates vis-à-vis de l'homme. Les recherches effectuées dans le cadre de cette étude auprès des différents organismes de santé publique et de recherche scientifique ne nous ont pas permis d'aborder cet aspect.

V.3 **Impacts des additifs sur la santé humaine**

V.3.1 Les triazoles

Nous n'avons trouvé que peu d'informations concernant la toxicité des triazoles vis-à-vis de l'homme.

D'après Switzenbaum *et al.* [1999], l'analyse de différentes formes méthylées du benzotriazole aurait révélé une toxicité croissante avec le taux de méthylation du composé.

Une recherche sur le site d'Environnement Canada nous indique par ailleurs que parmi les 19 formes de benzotriazole figurant sur la liste des substances recensées dans le cadre de l'évaluation des risques pour la LCPE (Loi Canadienne de Protection de l'Environnement) de

1999, seules 4 d'entre elles sont identifiées comme répondant au critère de catégorisation vis-à-vis de l'environnement et une seule vis-à-vis du critère santé humaine. La toxicité pour l'homme de ces composés est identifiée comme faible par cet organisme.

V.3.2 Les alkylphénols

De récentes études ont démontré le potentiel toxicologique des alkylphénols (AP) principalement en tant que perturbateurs endocriniens chez l'animal mais aussi chez l'homme [Grisolia *et al.*, 2004]. De par leur structure chimique, les AP peuvent se fixer, par compétition avec l'oestrogène, sur les récepteurs oestrogéniques. Ceci entraîne notamment une altération du métabolisme stéroïdien et de la croissance testiculaire [Ying *et al.*, 2002].

Des effets directs des nonylphénols (NP) sur la structure et les fonctions de l'ADN ont par ailleurs été observés dans la larve de bernacle. Ce mécanisme pourrait être responsable des effets de perturbation hormonale observés dans l'ensemble des organismes vivants. Peu d'informations sont disponibles sur la toxicité des octylphénols (OP) et dérivés, cependant, il a été démontré une toxicité sur l'activité oestrogénique quarante fois plus importante pour les OP par rapport aux NP [Becue et Nguyen, 2004].

Des travaux récents ont soulevé des préoccupations relevant directement de la santé humaine, concernant en particulier les effets sur les fonctions du sperme chez les mammifères et la détérioration de l'ADN dans les lymphocytes humains [Becue et Nguyen, 2004].

VI. Conclusions

Les opérations de viabilité hivernale, nécessaires au maintien et à la sécurité de l'activité aérienne dans les régions exposées au froid, occasionnent le déversement de produits chimiques de dégivrage et de déverglçage sur les zones aéroportuaires. Ces produits composés principalement en France d'acétates, de formiates et de glycols ne sont pas sans conséquence sur l'environnement et présentent des risques pour les milieux naturels et la ressource en eau.

Hormis quelques grosses infrastructures aéroportuaires, la majorité des aéroports nationaux ne dispose actuellement d'aucun dispositif permettant la récupération préalable ou le traitement des produits utilisés pour le dégivrage des avions et le déverglçage des aires aéronautiques avant leur rejet dans l'environnement [Mars, 2006].

Face à cette situation, le STAC a initié un programme d'actions en 2006 sur cette thématique de façon à améliorer les connaissances en la matière et à proposer des pistes d'amélioration quant aux pratiques actuelles des opérations de viabilité hivernales.

La présente étude s'inscrit dans ce programme et concerne l'évaluation des impacts environnementaux et sanitaires des principaux fondants chimiques employés.

D'un point de vue environnemental, les composés chimiques de base des produits commerciaux utilisés sur les aéroports, acétates, formiates et glycols, sont facilement biodégradables ; l'impact est par conséquent assez faible pour ce qui concerne les eaux souterraines car ces produits sont très largement dégradés en amont dans le sol qu'ils doivent traverser pour atteindre les nappes. A titre de comparaison, si quelques valeurs de charge organique apparaissent fortes ponctuellement lors des opérations de viabilité hivernale, elles sont en moyenne sur l'année de 2 à 5 fois inférieures aux charges mesurées sur des eaux de ruissellement urbain [Bachoc *et al.*, 1993].

Le problème de la charge organique se pose essentiellement dans les eaux de surface et les sols eux-mêmes. L'apport de fortes quantités de matières dégradables peut en effet provoquer une eutrophisation et une désoxygénation du milieu récepteur, comme une modification importante des concentrations de carbone et d'azote nécessaires au métabolisme des organismes y vivant.

La toxicité des glycols, acétates et formiates, est malgré tout assez faible du fait de la non accumulation de ces substances dans les écosystèmes. Le risque principal de l'utilisation des fondants chimiques ne réside donc pas dans leurs composants principaux mais bien dans les additifs (triazoles, éthoxylates d'alkylphénols) présents dans les formulations commerciales, dont l'introduction permet d'améliorer les performances des produits.

Ces substances souvent très mobiles ne se dégradent pas dans l'environnement et persistent ainsi dans les milieux. Elles sont de plus jugées toxiques pour l'animal comme pour l'homme à des concentrations très faibles.

Considérées au niveau européen comme substances dangereuses elles sont appelées à être substituées à terme dans les produits de viabilité hivernale ; l'industrie chimique est fortement incitée à agir dans ce sens.

Cela ne doit en aucun cas dissuader les gestionnaires d'aéroports de mettre en place des dispositifs de récupération et de traitement des eaux de ruissellement (bassins tampon, stations d'épuration, etc.) et d'employer des techniques de dégivrage et déverglçage moins consommatrices en fondants chimiques afin de concilier sécurité du trafic aérien et protection de l'environnement.

Nous proposons enfin que le STAC puisse inciter les partenaires et acteurs de l'aviation civile à lancer des études spécifiques sur les impacts réels des produits sur les différents compartiments environnementaux car si les données générales ne manquent pas sur la plupart des substances, peu d'études et de recherches ont porté sur le contexte aéroportuaire (concentrations, fréquence, topographie, etc.). Il pourrait être intéressant en particulier d'étudier la vitesse de dégradation de chacun des produits afin de pouvoir les comparer dans des conditions expérimentales identiques.

VII. Fiches pratiques par substance

Les fiches présentées dans ce paragraphe, reprennent de façon synthétique les informations présentées dans le cadre du rapport. Elles ont été établies à partir :

- des fiches substances de l'INERIS (2005),
- des fiches de données de sécurité INTERCHIMIE (2001),
- des fiches internationales de sécurité chimique (1993 et 1999),
- des fiches toxicologiques INRS (1994),

pour les substances répertoriées.

Les fiches pratiques de ce rapport présentent les principales caractéristiques physico-chimiques des substances, les dangers physiques et chimiques qu'elles représentent et des informations sur la toxicité chez l'homme et les impacts environnementaux. Elles ne comprennent en revanche pas de recommandations de stockage, conditionnement, manipulation, protection individuelle, ni d'aspects réglementaires (hygiène et sécurité du travail, protection de l'environnement), etc.

Elles ne concernent enfin que les composés principaux des dégivrants et déverglaçants étudiés. Les données disponibles relatives aux additifs (triazoles et éthoxylates d'alkylphénols) n'ont en effet pas permis l'établissement des fiches suffisamment complètes.

Propylène glycol			
Formule : CH ₃ CH(OH)CH ₂ (OH) ou C ₃ H ₈ O ₂		Synonyme : Mono-propylène glycol 1,2-Propanédiol, Dihydroxy-1-2 propane, Méthyléthylène glycol, 1,2-Propylène glycol, etc.	
Données physico-chimiques			pH 7
Aspect physique		Liquide incolore, légèrement visqueux, peu volatil et pratiquement inodore.	
Le propylène glycol est très hygroscopique, miscible à l'eau et à de nombreux solvants organiques, notamment l'éthanol, l'acétone, l'oxyde de diéthyle. Il est insoluble dans les hydrocarbures.			
Masse molaire	76,1 g/mol	Densité / à l'eau	1,04
Point de fusion	- 60°C	Solubilité dans l'eau :	Haute (soluble à 25°C)
Point d'ébullition	189°C (pression atm.)	T° auto-inflammation	371°C
Tension de vapeur	11 Pa (à 20°C)	Limites d'explosivité dans l'air (% volume)	2,6 à 12,5
Densité / à l'air	2,6		
Dangers			
Physiques		Le propylène glycol est un liquide modérément inflammable, dont les vapeurs, plus lourdes que l'air, peuvent former des mélanges explosifs avec ce dernier.	
Chimiques		Le propylène glycol est un produit stable dans des conditions normales d'emploi. A température élevée, il s'oxyde en donnant naissance à des produits tels que le propionaldéhyde et les acides lactique, pyruvique et acétique. Il peut réagir vivement avec les produits oxydants forts.	
Toxicité chez l'homme			Peu toxique
Le propylène glycol est réputé peu toxique. Les effets observés font suite à son emploi dans des médicaments, des aliments, des produits cosmétiques et ne proviennent pas d'expositions professionnelles. Il n'est pas considéré comme dangereux à l'inhalation ni particulièrement dangereux au contact de la peau dans des conditions normales d'utilisation.			
Effets selon modes d'exposition			
	Exposition aiguë	Exposition chronique	
Inhalation	Aucun effet suite à l'inhalation pendant une heure d'un aérosol contenant 10% de propylène glycol.	Troubles neurologiques allant de la simple torpeur jusqu'au coma (sujets particulièrement sensibles).	
Ingestion	Aucun effet métabolique ou biologique observé après ingestion d'une forte dose de propylène glycol.	Production de métabolites peu toxiques (acides lactique et pyruvique) pouvant être responsables de troubles métaboliques sans complication rénale, guérissant sans séquelle après arrêt de l'administration.	
Voie cutanée	De fortes concentrations dans l'eau maintenues sur la peau provoquent	Apparition de dermatites probablement plus irritatives	

	une irritation due à une rétention de la transpiration par la peau. Apparition d'une irritation modérée suite à un contact occlusif ou de projections de produit pur. Aucune réaction observée en revanche lors de tests à l'air libre.	qu'allergiques.	
Impacts environnementaux			
<p>Le propylène glycol se dégrade rapidement lors de la phase de vaporisation. Sa demi-vie est estimée à 32 h dans une atmosphère ambiante moyenne. Il se bio-dégrade également assez facilement dans l'eau. Il n'est pas sujet à l'hydrolyse, l'oxydation, la volatilisation, la bio-concentration, ni à l'adsorption aux sédiments.</p> <p>Il se dégrade rapidement par biodégradation dans le sol. Il réagit également au lessivage en raison de sa grande mobilité et de son faible pouvoir d'adsorption. Cependant, la biodégradation simultanée du produit peut être assez rapide pour limiter l'effet du lessivage.</p> <p>Le propylène glycol est censé ne pas être dangereux pour les espèces aquatiques.</p>			
DCO	1 848 g/l	DBO5	1000 g/l (20°C)
Classification environnementale		Substance non inscrite à l'annexe 1 de la directive CE/67/548	
Ecotoxicologie			
Eau	<u>Eau douce</u>	<u>Eau marine</u>	
CL/CE50 algues	19 000 mg/l	19 100 mg/l	
CL/CE50 invertébrés	18 340 mg/l	18 800 mg/l	
CL/CE50 poissons	46 500 mg/l	-	
NOEC/CE10 algues	15 000 mg/l	< 5 300 mg/l	
NOEC/CE10 invertébrés	-	-	
NOEC/CE10 poissons	-	-	
Sédiments	Non déterminé		
Sol	Non déterminé		
Micro-organismes	NOEC Pseudomonas putida	20 000 mg/l	

Urée technique			
<u>Formule</u> : NH ₂ CONH ₂ ou CH ₄ N ₂ O		<u>Synonyme</u> : Carbamide	
Données physico-chimiques			
Aspect physique		Cristaux blanc d'odeur caractéristique.	
L'urée technique est un amide, obtenu par réaction entre l'ammoniac (NH ₃) et le dioxyde de carbone (CO ₂) sous hautes pressions et températures.			
Masse molaire	60,10 g/mol	Solubilité dans l'eau :	miscible
Point de fusion	132,7-135°C	Densité / à l'eau	1,32
Dangers			
Physiques		Pas de risque d'incendie ni d'explosion. L'évaporation à 20°C est négligeable ; une concentration gênante de particules dans l'air peut cependant être atteinte rapidement si l'urée est sous forme de poudre.	
Chimiques		L'urée se décompose en chauffant fortement au-dessus du point de fusion, produisant des gaz toxiques. C'est un oxydant fort qui réagit avec les matières combustibles et les réducteurs.	
Toxicité chez l'homme			Non toxique
L'urée est un composé azoté non corrosif et non toxique pour l'homme. Cependant, la formation de NH ₃ et de NO ₃ ⁻ présente un risque pour la santé de l'homme. Les nitrates, produits de la dégradation de l'urée, se transformant, de plus, en nitrites peuvent en effet présenter des dangers pour la santé des nourrissons et des fœtus.			
Effets selon modes d'exposition			
	Exposition aiguë	Exposition chronique	
Inhalation	Effet irritant pour les yeux.		
Ingestion			
Voie cutanée			
Impacts environnementaux			
L'impact de l'urée en elle-même est très faible mais sa décomposition produit de l'ammoniac dont l'impact sur l'environnement se traduit par une augmentation de la demande biologique en oxygène. L'ammoniac est par ailleurs toxique pour le milieu aquatique.			
DCO	2 100 mg/g	DBO	

Acétate de sodium			
<u>Formule</u> : CH ₃ COONa		<u>Synonyme</u> : Acétate de soude Sel sodique de l'acide acétique	
Données physico-chimiques			
Aspect physique		Poudre cristalline blanche	
L'acétate de sodium est un combustible. Des particules finement dispersées forment des mélanges explosifs dans l'air.			
Masse molaire	82,04 g/mol	Solubilité dans l'eau :	47 g/100 ml
Point de fusion	324°C	T° auto-inflammation	611°C
Point d'ébullition		Limites d'explosivité dans l'air (% volume)	
Dangers			
Physiques		Possibilité d'explosion de poussières si le produit est sous forme de poudre ou de granulés mélangés dans l'air.	
Chimiques		La substance se décompose en chauffant fortement au-dessus de 120°C ou au contact d'acides forts, produisant de l'acide acétique. La solution dans l'eau est une base moyennement forte.	
Toxicité chez l'homme			Peu toxique
L'inhalation de cette substance peut causer une irritation du nez, de la gorge et des voies respiratoires. Elle peut également provoquer de légères irritations de la peau, des yeux et du système digestif.			
Effets selon modes d'exposition			
	Exposition aiguë		Exposition chronique
Inhalation	Apparition de maux de gorge accompagnés d'une irritation des voies respiratoires.		
Ingestion			
Voie cutanée	Effet irritant provoquant des rougeurs de la peau et des yeux.		
Impacts environnementaux			
L'acétate de sodium est moins toxique pour les espèces aquatiques que le NH ₃ provenant de la dégradation de l'urée. Sa DBO est 10 fois plus faible que celle de l'urée et il ne contribue pas au phénomène d'eutrophisation. Les aspects négatifs de l'utilisation de ce produit résident dans la présence des ions sodium. Le problème de toxicité de ces ions se posent dès lors qu'ils sont apportés en excès au milieu.			
DCO	410 mg/g	DBO	

Acétate de potassium			
<u>Formule</u> :		C ₂ H ₃ KO ₂ ou CH ₃ COOK	
		<u>Synonyme</u> :	
Données physico-chimiques			pH alcalin
Aspect physique	Flocons, poudre cristalline blanche		
L'acétate de potassium est un combustible. Des particules finement dispersées forment des mélanges explosifs dans l'air.			
Masse molaire	98,14 g/mol	Solubilité dans l'eau :	256 g/100 ml
Point de fusion	292°C	T° auto-inflammation	
Dangers			
Physiques	Possibilité d'explosion de poussières si le produit est sous forme de poudre ou de granulés mélangés dans l'air.		
Chimiques	La combustion de l'acétate de potassium provoque la formation d'oxydes de potassium et de carbone. La substance se décompose en chauffant fortement, au contact d'acides forts, produisant des fumées d'acide acétique. La solution dans l'eau est une base moyennement forte.		
Toxicité chez l'homme			Peu toxique
L'inhalation de cette substance peut causer une irritation du nez, de la gorge et des voies respiratoires. Elle peut également provoquer de légères irritations de la peau, des yeux et du système digestif. Les effets de l'acétate de potassium sur les jeunes enfants ou les adultes présentant une insuffisance rénale ou cardiaque concernent les irritations et inflammation de l'estomac, les faiblesses musculaires, brûlures, tremblements et engourdissements des membres, un ralentissement du rythme cardiaque, et une diminution de la pression artérielle. Ces effets sont attribués par les experts au potassium.			
Effets selon modes d'exposition			
	Exposition aiguë	Exposition chronique	
Inhalation	Apparition de maux de gorge accompagnés d'une irritation des voies respiratoires.		
Ingestion	Inflammation de l'estomac chez les sujets sensibles.		
Voie cutanée	Effet irritant provoquant des rougeurs de la peau et des yeux.		
Impacts environnementaux			
Dommages minimaux sur la végétation, toxicité modérée sur les organismes aquatiques, risque d'épuisement de l'oxygène dans les sols et les l'eau.			
DCO	180 g/l	DBO	

Formiate de sodium			
<u>Formule</u> : NaCHO ₂		<u>Synonyme</u> :	
Données physico-chimiques			
Aspect physique		Granules ou poudre blanche soluble dans l'eau.	
Masse molaire		68,02	Solubilité dans l'eau
Point de fusion		253°C	Densité / à l'eau
			81 g/100 ml (20°C)
			1,9
Dangers			
Physiques		Le formiate de sodium est non combustible.	
Chimiques		Le formiate de sodium se décompose en chauffant fortement au-dessus de 253°C pour former de l'oxalate de sodium, de l'hydrogène et du monoxyde de carbone, et au contact d'acides, il produit des vapeurs d'acide formique.	
Toxicité chez l'homme			
Très peu d'études et/ou références sont apparemment disponibles concernant les effets et l'éventuelle toxicité des formiates vis-à-vis de l'homme.			
Effets selon modes d'exposition			
	Exposition aiguë		Exposition chronique
Inhalation	L'évaporation à 20°C est négligeable, une concentration dangereuse de particules en suspension dans l'air peut cependant être atteinte rapidement par dispersion. Effet irritant pour les voies respiratoires.		
Ingestion	Possibilité d'effet sur les reins, entraînant du sang dans les urines.		
Voie cutanée	Effet irritant pour les yeux.		
Impacts environnementaux			
Problème de la toxicité des ions sodium			
DCO	230 mg/g	DBO	

Formiate de potassium			
Formule : HCOOK		Synonyme :	
Données physico-chimiques			pH neutre
Aspect physique			
Masse molaire	84,10	Solubilité dans l'eau :	
Point de fusion		T° auto-inflammation	
Point d'ébullition		Limites d'explosivité dans l'air (% volume)	
Dangers			
Physiques			
Chimiques			
Toxicité chez l'homme			
Très peu d'études et/ou références sont apparemment disponibles concernant les effets et l'éventuelle toxicité des formiates vis-à-vis de l'homme.			
Effets selon modes d'exposition			
	Exposition aiguë		Exposition chronique
Inhalation			
Ingestion			
Voie cutanée			
Impacts environnementaux			
DCO	40 g/l	DBO	

Bibliographie

Ouvrages et documents consultés pour la synthèse :

BACHOC, A., CHEBBO, G. et MOUCHEL, J.M., 1993. La pollution des rejets pluviaux urbains : son importance, ses caractéristiques, quelques éléments sur ses origines et son interception, pp 9-24. Rejets urbains par temps de pluie : pollutions et nuisances, B. TASSIN et D. THEVENOT, Actes des troisièmes journées du DEA Sciences et techniques de l'environnement, ENPC. 255 p.

BECUE, A. et NGUYEN, R., 2004. Etude de l'analyse des Alkylphénols. Rapport final INERIS / MEDD, Direction de l'Eau. 34 p.

BLIEFERT, C. et PERRAUD, R., 2001. Chimie de l'environnement, air, eau, sols, déchets. Editions DeBoeck Université, Paris, 477 p.

BRANCHU, Ph., 2001. Qualité des eaux de ruissellement sur l'aéroport de Lille-Lesquin : suivi en période hivernale. Rapport LRPC Lille, 54 p.

BREEDVELD, G.D., ROSETH, R., HEM, L.J., et SPARREVIK, M., 2002. Triazoles in the terrestrial environment. Final report. n°20001103-1. 20 p.

BREEDVELD, G.D., ROSETH, R., SPARREVIK, M., HARTNIK, T. et HEM, L.J., 2003. Persistence of the deicing additive benzotriazole at an abandoned airport. Water, Air and Soil Pollution, Vol. 3, n°3, pp 91-101.

BRIGNON, J-M., 2005. Nonylphénols et éthoxylates. INERIS – Données technico-économiques sur les substances chimiques en France. DRC-MECO, Version 1. 24 p.

BRITT, E., 2003. Endocrine disrupteur found in aircraft deicer. Environmental Science and Technology, Vol. 37, n°19. pp 345A-346.

CANCILLA, D.A., 2006. Characterization of aircraft deicer and antiicer components and toxicity in airport snowbanks and snowmelt runoff. Environmental Science and Technology, Vol. 40, n°10. pp 3195-3202.

CANCILLA, D.A., HOLTKAMP, A., MATASSA, L., et FANG, X., 1997. Isolation and characterization of Microtox-active components from aircraft deicing/anti-icing fluids, Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 16, n°3, pp 430-434.

CLAVEL, T., FALCY, M., HESBERT, A., JARGOT, D., PROTOIS, J.C., REYNIER, M., et SCHNEIDER, O., 1994. Propylène glycol, Fiche toxicologique INRS n°226, Cahiers de notes documentaires, n°154, 1er trimestre 1994. pp 125-128.

CNRS, 2006. L'eau douce - Une ressource précieuse. Dossiers scientifiques SagaScience. <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/accueil.html>

CORSI, S.R., BOOTH, N.L. et HALL, D.W., 2001. Aircraft and runway deicers at General Mitchell International Airport, Milwaukee, Wisconsin, USA. 1. Biochemical oxygen demand and dissolved oxygen in receiving streams. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 20, n°7. pp 1474-1482.

CORSI, S.R., GEIS, S.W., LOYO-ROSALES, J.E., SHEESLEY, R.J., FAILEY, G.G. et

CORSI, S.R., ZITOMER, D.H., FIELD, J.A. et CANCELLA, D.A., 2003. Nonylphénol ethoxylates and others additives in aircraft deicers, antiicers, and waters receiving airport runoff. *Environmental Science and Technology*, Vol. 37, n°18. pp 4031-4037 .

DIRECTIVE 2003/53/CE du Parlement Européen et du Conseil du 18 juin 2003 portant vingt-sixième modification de la directive 76/769/CEE du Conseil concernant la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses (nonylphénol, éthoxylate de nonylphénol et ciment).

Environnement Canada, 2006. Loi Canadienne de Protection de l'Environnement, liste des substances à risques. http://www.ec.gc.ca/RegistreLCPE/subs_list/

FICHES INTERNATIONALES DE SECURITE CHIMIQUE, 1993. Propylène glycol, Urée, Acétate de sodium, Acétate de potassium, Formiate de sodium. Fiches préparées dans le cadre de la coopération entre le Programme International sur la Sécurité Chimique et la Commission Européenne.

FIANDT, J., 2005. Training recommendations and background information for de-icing/anti-icing of aircraft on the ground – 2nd Edition. AEA (Association of European Airlines)'s Technical and Operations Committee. 74 p.

FISCHEL, M., 2001. Evaluation of selected deicers based on a review of the literature. Colorado Department of Transportation, The SeaCrest Group, Final Report n°CDOT-DTD-R-2001-15. 117 p.

FOURNIER, E., 2001. Etude de la biodégradabilité des produits dégivrants et déverglaçants utilisés dans le domaine aéroportuaire. DEA Sciences et Techniques de l'Environnement de l'Université Val de Marne, Paris XII. 53 p.

GAO (United States General Accounting Office), 2000. Aviation and the Environment. Airport operations and future growth present environmental challenges. Report to the Ranking Democratic Member, Committee on Transportation and infrastructure, House of representatives. GAO/RCED-00-153, Chapter 3 : Water quality is a primary concern and challenge for airports. pp 45-49. <http://www.gao.gov/archive/2000/rc00153.pdf>

GRISOLIA, C.K., BILICH, M.R. et FORMIGLI, L.M., 2004. A comparative toxicologic and genotoxic study of the herbicide arsenal, its active ingredient imazapyr, and the surfactant nonylphenol ethoxylate. *Ecotoxicology and environmental safety*, Vol. 59, n°1. pp 123-126.

HUREAUX, L., 1997. Etude de la biodégradation des glycols et des acétates dans les eaux pluviales. DEA de l'Université d'Orsay, Paris XI. 52 p.

ILN (Western Washington University's Integrated Laboratory Network), 2005. Research Interests, Environmental impact of aircraft deicing. <http://www.ac.wvu.edu/~cancilla/dacresearch.html/>

INERIS, 2005. Propylène glycol, Fiche substance. Mise à jour du 07/02/2005.

INTERCHIMIE, 2001. Propylène glycol codex, Fiche de données de sécurité, version B0 du 15/11/2001.

ISOBE, T., NISHIYAMA, H., NAKASHIMA, A. et TAKADA, H., 2001. Distribution and behaviour of nonylphenol, octylphenol and nonylphenol monoethoxylate in Tokyo metropolitan area : their association with aquatic particles and sedimentary distributions. Environmental Science and Technology, Vol. 35. pp 1041-1049.

JETOC (Japan Chemical Industry Ecology-Toxicology & Information Center), 2001. Conclusions récapitulatives du SIAR (SIDS Assessment Report, SIDS : Screening Information Data Set), SIDS Assessment Meeting, 23-26 janvier 2001. http://www.jetoc.or.jp/HP_SIDS/pdf/57-55-6.pdf

LE DEAN, A., TABARD, L. et LEGRET, M., 1995. Pollution des eaux de ruissellement sur les aéroports – Origine et traitement. Etude bibliographique LCPC, 129 p.

LEGRET, M., LE MARC, C. et DEMARE, D., 1995. Qualité des eaux de ruissellement sur l'aéroport de Nantes-Atlantique. LCPC, 52 p.

LEGRET, M., LE MARC, C. et DEMARE, D., 1997. Qualité des eaux de ruissellement sur l'aéroport de Marseille-Provence. LCPC, 35 p.

LEGRET, M., STEPHANINI, F., DEMARE, D., DORMAL, G., MAHAUT, L. et AYMARD, R., 1998. Qualité des eaux de ruissellement de l'aéroport de Lyon-Satolas. LCPC, 38 p.

MARS, B., 2006. Eau et aéroports : prise en compte des opérations de viabilité hivernale dans la gestion aéroportuaire. Enquête dégivrage/déverglçage – Rapport statistique 2003-2006. STAC, Version Projet VOR1 du 13/11/2006. 54 p.

MERICAS, D., 2006. The deicing dilemma : Balancing safety, environmental impact, and regulatory compliance at airports. Limno-Tech, Inc (LTI), Airport Services, Ann Arbor, Michigan. http://www.limno.com/internet/pdf/Deicing_Dilemma.pdf

MOUCHEL, J-M., 2002. Evaluation de la dégradabilité des produits de dégivrage et de déverglçage utilisés dans le domaine aéroportuaire. Etude réalisée au CEREVE pour le compte du STBA. 55 p.

Services hivernaux sur chaussées aéronautiques, 2002. Guide technique du STBA, 72 p.

Site intranet du Cete de l'Est, 2005. La viabilité hivernale et l'influence des fondants sur l'environnement. Mise à jour 14 juin 2005. <http://www.viabilite-hivernale.equipement.gouv.fr/>

SWITZENBAUM, M.S., VELTMAN, S., SCHOENBERG, T., DURAND, C.M., MERICAS, D. et WAGONER, B., 1999. Best management practices for airport deicing stormwater. University of Massachusetts/Amherst, Water Resources Research Center, Publication n°173. 57 p.

THIRIONET, O., GRECEOIS, B., 2000. Eau et aéroport, Conception et dimensionnement des réseaux de drainage des aéroports. Guide technique, Service Technique des Bases Aériennes (STBA), 56 p.

THIRIONET, O., HOEPPE, Ph., GRECEOIS, B., 1999. Pollution des eaux de ruissellement sur les aéroports. Information technique du STBA. 4 p.

THOMAS, J.A., DESESSO, J.M., FOWLER, B.A., GINSBERG, G.L., HANSEN, D., HINES, R., PORTIER, K. et ROZMAN, K.K., 2003. NTP (National Toxicology Program)-CERHR (Center for the Evaluation of Risks to Human Reproduction) expert panel report on the reproductive and developmental toxicity of propylene glycol. U.S. Department of Health and Human Services, Report n°NTP-CERHR-PG-03. 82 p.

VALCIN, F., 1999. Fondants routiers et environnement – Etat des connaissances et propositions pour la maîtrise de l'impact des fondants sur l'environnement. Rapport d'étude n°996423 Cete de l'Est, SETRA/CSTR. 94 p.

YING, G-G., WILLIAMS, B. et KOOKANA, R., 2002. Environmental fate of alkylphénols and APE – A review. Environmental International, Vol. 28, pp 215-226.

Autres sites et ouvrages consultés :

ACIPA, 2006. Association Citoyenne Intercommunale des Populations concernées par le projet d'Aéroport de Notre Dame des Landes. <http://acipa.free.fr/index.htm>

Association of European Airlines, 2005. Recommendations for deicing/antiicing of aircraft on the ground. Twentieth Edition. 37 p. www.aea.be

BERNADAC, A., MARS, B., BIOTTE, G., et FOURNIER, E., 2005. Loi sur l'eau, vers la mise en conformité des infrastructures aéroportuaires. Site des ingénieurs TPE, 6 juillet 2005. 5 p.

Base de données CHEMINFO, 2006. Centre Canadien d'Hygiène et de Sécurité au Travail. <http://www.cchst.ca/products/databases/cheminfo.html>

Charte de l'Environnement de l'aéroport de Beauvais, 2005. Signée par la Préfecture de l'Oise, la Chambre de Commerce et d'Industrie de l'Oise, les communes desservies, et les associations de défense de l'Environnement, 21 janvier 2005. 11 p.

Impacts des fondants routiers sur l'environnement, quelle démarche mettre en place ? 2006. Séminaire d'échange organisé par J. Livet, Cete de l'Est/Equipe ressource Viabilité hivernale. Paris, 27 octobre 2006.

Lavoisier-DATEC, 2006. Distributeur français de bases de données professionnelles. <http://www.datec.lavoisier.fr/>

NTP (National Toxicology Program)-CERHR (Center for the Evaluation of Risks to Human Reproduction), U.S. Department of Health and Human Services. <http://cerhr.niehs.nih.gov>

Site US-EPA, 2006. Industrial Water Pollution Controls, Airport deicing effluent guidelines.
<http://www.epa.gov/waterscience/guide/airport/index.html>

Substitution and recycling of aircraft deicing products, 2003.
http://p2library.nfesc.navy.mil/P2_Opportunity_Handbook/6_I_7.html

TOXNET Toxicology Data Network, 2006. Databases on toxicology, hazardous chemicals, environmental health, and toxic releases. National Library of Medicine. United States.
<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search>

Transports Canada, 2005. Guide sur les durées d'efficacité – Hiver 2005-2006. 28 p.

Glossaire

Réalisé à partir de :

BLIEFERT, C. et PERRAUD, R., 2001. *Chimie de l'environnement, air, eau, sols, déchets.* Editions DeBoeck Université, Paris, 477 p.

JOURDAIN, M-J. et BISPO, A., 2002. *Ecotoxicité des sols et des déchets. Résultats des tests biologiques.* Collection Données et Références, ADEME : Angers. 96 p.

Absorption : processus de transfert actif ou passif par lequel une substance traverse les membranes biologiques ou toute autre barrière, vers un organisme vivant.

Accumulation : apport successif d'une substance dans un individu cible, un organe ou un compartiment de l'environnement, qui entraîne une augmentation en quantité ou en concentration de cette substance dans l'individu, l'organe ou l'environnement.

Adsorption : adhésion de molécules ou d'ions à des surfaces solides.

Anthropogénique : généré par les activités de l'homme.

Bernacle : (syn. Anatife) crustacé marin ressemblant extérieurement à un mollusque en raison de sa coquille calcaire formée de plaques disjointes et vivant fixé aux bois flottants par un fort pédoncule.

Bio accumulation : résultat net de l'accumulation d'une substance dans un organisme après absorption, distribution et élimination des voies d'exposition considérées.

Bio dégradation ou **bio décomposition** : dégradation moléculaire d'une substance catalysée par des enzymes (ou décomposition par des organismes).

Bio disponibilité : capacité d'une substance à interagir avec les systèmes biologiques d'un organisme.

Biomasse : quantité de matériel vivant.

Concentration létale moyenne (CL50) : concentration de substance dans le milieu estimée être létale pour 50% des organismes tests exposés. La CL50 s'exprime habituellement comme étant une valeur dépendant du temps (CL50 24h, 48h, etc.).

Demande Biologique en Oxygène (DBO) : quantité d'oxygène (en mg/l ou autre) que des bactéries utilisent pour décomposer partiellement ou oxyder totalement en CO₂ des substances organiques dans l'eau, en un temps donné (généralement exprimée à 5 jours, DBO₅), à l'aide de leur système enzymatique. La DBO est une mesure de la teneur dans l'eau en substances bio chimiquement dégradables.

Demande Chimique en Oxygène (DCO) : quantité d'oxygène (en mg/l ou autre) qui est nécessaire pour oxyder principalement les composés organiques présents dans l'eau. La valeur de la DCO prend également en compte les composés difficilement dégradables ou non dégradables biologiquement.

Dose : mesure de l'exposition totale à un polluant.

Dose effective (DE50) : Dose effective qui affecte 50% de la population testée.

Dose létale moyenne (DL50) : Dose de substance estimée être létale pour 50% des organismes testés. Généralement utilisée pour des tests sur animaux tels que rats, souris et chiens.

Enzyme : protéine qui agit comme un catalyseur sélectif permettant à des réactions chimiques de se mettre en place rapidement dans les cellules vivantes sous certaines conditions physiologiques.

Létal : qui cause la mort par effet direct.

LOEC (Lowest Observed Effect Concentration) : concentration la plus faible testée pour laquelle un effet significativement différents des contrôles est observé.

NOEC (No Observed Effect Concentration) : concentration testée sans effet observé (ie aucun effet statistiquement différent des contrôles n'est observé).

Toxicité : propriété intrinsèque ou capacité d'une substance à générer un dommage sur les organismes vivants suite à des interactions physico-chimiques ou biologiques.

Toxicité aiguë : dommage biologique intervenant suite à une exposition courte (par rapport au temps de vie de l'organisme exposé).

Toxicité chronique : dommage biologique intervenant suite à une exposition de longue durée à un agent stressant (changement de métabolisme, de reproduction, de croissance ou d'aptitude à survivre).

Ubiquitaire : qui peut être présent en plusieurs endroits à la fois.

Annexes

Annexe 1 :

Nomenclature des principaux alkylphénols retrouvés dans l'environnement

Annexe 2 :

Propylène glycol

INERIS, Fiche substance, 2005

INTERCHIMIE, Fiche de données de sécurité, 2001

INRS, Fiche toxicologique n°226, 1994

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Urée

Fiches internationales de sécurité chimique, 1993 et 1999

Acétate de sodium

Fiches internationales de sécurité chimique, 1993 et 1999

Acétate de potassium

Fiches internationales de sécurité chimique, 1993 et 1999

Formiate de sodium

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Annexe 3 :

Notices descriptives des sites Internet des bases de données CHEMINFO, CHEMINDEX, et CHEM-BANK

Annexe 1 :

Nomenclature des principaux alkylphénols retrouvés dans l'environnement

Annexe 2 :

Propylène glycol

INERIS, Fiche substance, 2005

INTERCHIMIE, Fiche de données de sécurité, 2001

INRS, Fiche toxicologique n°226, 1994

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Urée

Fiche internationale de sécurité chimique, 1999

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Acétate de sodium

Fiche internationale de sécurité chimique, 1999

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Acétate de potassium

Fiche internationale de sécurité chimique, 1999

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Formiate de sodium

Fiche internationale de sécurité chimique, 1993

Annexe 3 :

Notices descriptives des sites Internet des bases de données
CHEMINFO, CHEMINDEX, et CHEM-BANK