

LES FLUIDES FRIGORIGÈNES

La Rpf

L'offre d'info des professionnels du froid



32 newsletters
par an

Accès à l'intégralité
du site

10 numéros
par an

Abonnez-vous sur www.larpf.fr dès 129 € TTC

La Rpf, une marque d'information **PYC ÉDITION**

Francis Meunier
Daniel Colbourne

^{La}
Rpf


LES FLUIDES FRIGORIGÈNES

Composés halogénés
et fluides naturels

DUNOD

Photographie de couverture : © Deyan Georgiev – Fotolia.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--



© Dunod, 2014

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-058779-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Remerciements	VIII
Avant-propos	1
Nomenclature et propriétés de quelques fluides frigorigènes	3

A

Généralités sur les fluides frigorigènes

Chapitre 1 : Contexte et enjeux	11
1.1 Des fluides naturels aux HFC : une longue histoire	11
1.2 Les fluides frigorigènes et l'environnement : le retournement de tendance	22
Chapitre 2 : Les contraintes environnementales et de sécurité	29
2.1 Les tendances dans la composition des HCFC et HFC	29
2.2 Les fluides frigorigènes et le trou dans la couche d'ozone	31
2.3 Les fluides frigorigènes et l'effet de serre : indicateurs d'évaluation	41
2.4 Réglementations, taxation et normes	52

B

Panorama des filières frigorigifiques

Chapitre 3 : Deux filières de fluides frigorigènes à faible PRG		75
3.1	Contexte : les mesures de réduction des émissions de CO ₂	75
3.2	La filière des HFC insaturés	77
3.3	La filière des fluides naturels	78
3.4	Des enjeux importants	80
Chapitre 4 : Les composés fluorés à PRG modéré ou faible		83
4.1	Introduction	83
4.2	Les HFC saturés	86
4.3	Les HFC insaturés	96
4.4	Les HCFC insaturés	111
4.5	Les mélanges à base de HFC, HFC insaturés et/ou HCFC insaturés	113
4.6	Conclusion sur les composés fluorés à PRG modéré ou faible	116
Chapitre 5 : Les fluides frigorigènes naturels inorganiques		119
5.1	L'ammoniac (R-717)	119
5.2	Le dioxyde de carbone, CO ₂ (R-744)	142
5.3	L'eau (R-718)	178
Chapitre 6 : Les fluides frigorigènes naturels organiques		187
6.1	Introduction	187
6.2	Domaines d'application pour les hydrocarbures	194
6.3	Aspects thermodynamiques	202
6.4	Comparaisons de performances	214
6.5	Réduction de la charge de fluide frigorigène	220
6.6	Les hydrocarbures et la sécurité	230

6.7	Conversion aux hydrocarbures d'unités utilisant des HFC ou des HCFC (<i>retrofitting</i>)	249
6.8	Compétences et formation pour les hydrocarbures	251
6.9	Autres fluides organiques éligibles comme fluides frigorigènes	253
6.10	Conclusion sur les fluides frigorigènes naturels organiques	254

C

Recommandations

Chapitre 7 : Conclusion et recommandations	257	
7.1	Quels fluides à PRG modéré ou faible sont éligibles pour quelle application et quel système ?	258
7.2	Les enjeux	263

Annexes

Annexe A : Liste de normes européennes à prendre en considération lors de l'utilisation de fluides frigorigènes inflammables	269
Annexe B : La Directive des équipements sous pression (DESP)	273
Index	277

Remerciements

Pour la rédaction de cet ouvrage, les auteurs ont bénéficié de l'accès à des documents de très grande qualité de GIZ, notamment sur les hydrocarbures, qui leur ont été très utiles.

Francis Meunier tient à remercier Paul Rivet pour son aide précieuse (fourniture d'informations et de documents) sur le CO₂ et l'ammoniac. Par ailleurs, il a profité de discussions très riches sur les enjeux internationaux avec Didier Coulomb, directeur de l'IIF et avec Gérard Cavalier, président de l'AFF, sur le contexte national.

Avant-propos

Les systèmes de production du froid et de pompes à chaleur étant hermétiques, l'utilisateur de ces produits ne fait généralement pas attention au fluide frigorigène qu'ils contiennent, et ce, d'autant plus que leur appellation (R-134a, R-1234yf, etc.) est pour le moins étrange pour le commun des mortels.

Mais, bien que réputés hermétiques, ces systèmes fuient légèrement et les fluides frigorigènes qu'ils contiennent ont des impacts sur l'environnement. Du coup, ils deviennent l'objet d'une attention particulière et suscitent l'intérêt des médias comme ce fut le cas avec le trou dans la couche d'ozone ou aujourd'hui avec l'effet de serre. La presse n'hésite pas à les qualifier de « super gaz à effet de serre »¹. La polémique entre Daimler et la Commission européenne, engagée en 2013, sur l'utilisation du nouveau fluide frigorigène, le R-1234yf, est loin d'être terminée à la rédaction de cet ouvrage et fait également la une de la presse².

À l'avenir, l'usage des fluides frigorigènes les plus utilisés va devoir être réduit de plus de 3/4 (de 79 % exactement) d'ici 2030 en Europe (d'après la nouvelle directive dite F-gaz).

Une page se tourne et l'on doit passer à d'autres fluides frigorigènes. Mais lesquels ? Là est toute la question.

Deux filières avec deux modèles professionnels et économiques existent et s'opposent. La première filière est fondée sur des fluides synthétiques à forte valeur ajoutée (donc chers) et la seconde repose sur des fluides dits naturels à moins forte valeur ajoutée (donc moins chers).

Le choix d'une filière ou d'une autre aura des conséquences importantes pour les professionnels ainsi que pour l'utilisateur final.

C'est cet ensemble de problèmes qu'aborde cet ouvrage, allant depuis le contexte et les impacts jusqu'aux enjeux économiques, d'organisation professionnelle, de sécurité et d'environnement, en passant par une description technique détaillée

1. *Le Monde* du 11 septembre 2013.

2. *Le Figaro* du 26/07/2013 : « Mercedes : Le ton monte entre la France et l'Allemagne » ; *Challenge, Auto* du 24/01/2014 « La clim jette un froid entre l'Allemagne et l'UE ».

et illustrée des techniques mises en jeu pour recourir à l'une ou l'autre de ces deux filières.

Le public visé est bien sûr celui des professionnels pour qui la question du choix du meilleur fluide est cruciale, mais également celui des étudiants du froid et du génie climatique ainsi que des décideurs et des législateurs, sans oublier le simple utilisateur final qui veut comprendre pourquoi il faut choisir ou, au contraire, rejeter tel ou tel fluide frigorigène.

Nomenclature et propriétés de quelques fluides frigorigènes

La nomenclature des fluides frigorigènes est donnée par la norme ANSI/ASHRAE 34.

Cette classification permet de classer de façon claire et univoque la totalité des fluides frigorigènes.

Le code d'identification comprend un préfixe constitué de lettres et un suffixe constitué de chiffres.

Les préfixes

Un fluide frigorigène est caractérisé par un préfixe R (pour le R du mot anglais *refrigerant*) suivi de plusieurs chiffres (WXYZ) : R-WXYZ.

On utilise parfois un préfixe matérialisant la nature du fluide comme : CFC, HCFC, HFC ou HC pour hydrocarbure.

Les suffixes

Les suffixes qui suivent le préfixe sont définis comme suit suivant la nature du fluide.

Les hydrocarbures et les halogénés saturés

- ▶ le premier en partant de la droite (chiffre des unités), Z, indique le nombre d'atomes de fluor. L'absence d'atomes de fluor conduit à zéro (cas des hydrocarbures, par exemple le propane : R-290) ;
- ▶ le second chiffre en partant de la droite (chiffre des dizaines), Y, indique le nombre d'atomes d'hydrogène (H) plus 1. En l'absence d'hydrogène, on obtient $Y = 1$ (cas du R-12) ;

- ▶ le troisième chiffre en partant de la droite (chiffre des centaines), X, indique le nombre d'atomes de carbones (C) moins un. Lorsqu'il n'y a qu'un carbone, il est nul et n'est pas indiqué (cas des R-12, R-22, R-32, etc.) ;
- ▶ enfin le quatrième chiffre en partant de la droite (chiffre des milliers), W, indique le nombre de liaisons carbone-carbone insaturées. En l'absence de double liaison, il est égal à zéro et n'est pas indiqué. C'est le cas pour les HFC et les hydrocarbures saturés. En revanche, pour les HFC et les hydrocarbures insaturés dotés d'une double liaison, il est égal à 1 ;
- ▶ de plus, dans le cas d'isomères, l'adjonction d'un indice représenté par une lettre minuscule permet de distinguer les isomères suivant leur asymétrie.

Le R-0134a (1,1,2-Tétrafluorométhane, $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$)

0 : nombre de doubles liaisons

1 : nombre d'atomes de carbones moins 1

3 : nombre d'atomes d'hydrogène plus 1

4 : nombre d'atomes de fluor

a : asymétrie la moins importante des isomères existant

Pour les composés cycliques, la lettre C est utilisée. Exemple le RC-318 pour l'octafluorocyclobutane ou C_4F_8 .

Pour les hydrocarbures le chiffre des unités est égal à zéro (absence de fluor), et la codification présentée précédemment vaut jusqu'à ce que le chiffre des dizaines soit inférieur à 10, c'est-à-dire jusqu'au propane pour les hydrocarbures saturés. Ainsi, on a R-50 pour le méthane (CH_4), R-170 pour l'éthane (C_2H_6) et R-290 pour le propane (C_3H_8). En revanche, à partir du butane, la série des R-600 a été créée (voir ci-dessous).

Les hydrocarbures et les halogénés insaturés

Le premier hydrocarbure insaturé est l'éthylène (R-1150, $\text{CH}_2=\text{CH}_2$) dont la température d'ébullition est de $-103,8\text{ }^\circ\text{C}$ et la température critique est de seulement $9,2\text{ }^\circ\text{C}$. Ces niveaux de température n'en font pas un fluide frigorigène attractif pour les applications de froid commercial et encore moins de climatisation. Cela n'a pas été l'hydrocarbure insaturé sur lequel les chimistes se sont orientés pour développer des HFC insaturés pour le froid.

C'est le second hydrocarbure insaturé, le propylène¹ (R-1270, $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$) dont la température d'ébullition est de $-47,6\text{ °C}$ et la température critique de $91,1\text{ °C}$ qui a servi de base pour le développement des HFC insaturés. Le R-1270 est lui-même utilisé comme fluide frigorigène (voir chapitre 6).

À partir du propylène, une famille de HFC insaturés (également appelés HFO car ce sont des oléfines²) a donc été développée, les R-1234. Le passage du R-1270 au R-1234 est décrit en détail dans le chapitre 4 et, ici, nous nous contenterons de décrire la codification pour ces fluides insaturés.

Le passage d'un hydrocarbure insaturé à un HFC insaturé se fait par substitution d'atomes de fluor à des atomes d'hydrogène et de cette façon, on obtient des HFC insaturés. Mais le propylène comptant 6 atomes d'hydrogène, la substitution de 4 atomes de fluor à 4 atomes d'hydrogène sur 6 donne naissance à plusieurs isomères. Afin de repérer les isomères les uns des autres, deux lettres sont utilisées en indice. Pour les molécules à base de propène à 3 carbones :

- ▶ le premier indice est utilisé pour caractériser la substitution sur l'atome de carbone central (voir figure 4.8) :
 - ▷ $-\text{Cl} : x$;
 - ▷ $-\text{F} : y$;
 - ▷ $-\text{H} : z$;
- ▶ le second indice désigne la substitution sur le carbone terminal de la liaison méthyle :
 - ▷ $=\text{CCl}_2 : a$;
 - ▷ $=\text{CClF} : b$;
 - ▷ $=\text{CF}_2 : c$;
 - ▷ $=\text{CHCl} : d$;
 - ▷ $=\text{CHF} : e$;
 - ▷ $=\text{CH}_2 : f$.

La présence d'indices x et/ou a, b, d signifie qu'il s'agit d'un HCFC insaturé à cause de la présence de chlore.

À titre d'exemple, nous allons expliciter la codification pour le R-1270 et le R-1234yf (pour plus de détails sur les formules développées de ces deux corps, voir chapitre 4).

1. Également appelé le propène.

2. Le terme générique pour les hydrocarbures insaturés est les « alcènes » mais dans le passé on disait les « oléfines ».

Le R-1270 ($\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$)

- 1 : une double liaison
- 2 : 3 atomes de carbone
- 7 : 6 atomes d'hydrogène
- 0 : pas de fluor

Le R-1234yf ($\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$ ou $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$)

- 1 : une double liaison
- 2 : 3 atomes de carbone
- 3 : 2 atomes d'hydrogène
- 4 : 4 atomes de fluor
- y : un atome de fluor substitué sur l'atome de carbone central
- f : le groupement CH_2 est conservé sans substitution

Par ailleurs, pour le R-1234ze qui possède un groupement CHF, il existe deux configurations suivant la position de l'atome d'hydrogène : une configuration cis, notée Z et une configuration trans, notée E. Ainsi, on a par exemple le R-1234ze(E).

Mélanges azéotropiques (série des 500) et zéotropiques (série des 400)

Les mélanges sont définis par des numéros d'identification et la proportion en masse des fluides frigorigènes auxquels ils correspondent : les fluides frigorigènes doivent être désignés dans l'ordre croissant de leur température d'ébullition.

Les mélanges zéotropiques se voient attribuer un numéro d'identification de la série 400. Ce numéro renvoie aux composants qui constituent le mélange indépendamment de leur composition. La lettre majuscule qui suit les chiffres caractérise les différentes compositions de fluides purs pour les mélanges contenant les mêmes composants.

Ainsi le R-410 est un mélange binaire de R-32 et de R-125 (R-32/R-125). Il existe le R-410A (50/50) et le R-410B (45/55).

Les mélanges azéotropiques se voient attribuer un numéro d'identification de la série 500.

Ainsi le R-507 est un mélange de R-125 et de R-143a et la composition massique du R-507A est de (50/50).

Composés organiques non classés dans les hydrocarbures précédents (série des 600)

Jusqu'au propane, les hydrocarbures saturés suivent la codification des hydrocarbures et des fluides halogénés. Mais à partir du butane, ils se retrouvent dans la série des 600.

C'est ainsi que l'on trouve des composés purement hydrogénés : le butane, R-600 ; l'isobutane, R-600a ; le pentane, R-601 ; l'isopentane, R-601a ; le néopentane, R-601b ; etc.

Mais on trouve également des composés oxygénés comme l'éthyl éther, R-610 ; ou des composés azotés comme la méthylamine, R-630 ; l'éthylamine, R-631.

Composés non organiques (série des 700)

Enfin, les composés non organiques sont dans la série des 700. Le numéro d'identification est formé en ajoutant la masse molaire relative du composant à la valeur 700.

Parmi ceux qui sont étudiés dans le chapitre 5, on a donc : l'ammoniac, R-717 ; le dioxyde de carbone, R-744 ; l'eau, R-718 ; mais on a également l'hydrogène, R-702 ; l'hélium, R-704 ; l'azote, R-728 ; etc.

Quelques propriétés de certains fluides frigorigènes

Parmi les propriétés des principaux fluides frigorigènes mentionnés dans cet ouvrage, nous avons retenu le nom, la catégorie et la formule chimique puis un certain nombre de propriétés physiques (masse molaire et les températures d'ébullition ainsi que critique). Ensuite, nous avons considéré les propriétés liées à l'inflammabilité et la valeur limite moyenne d'exposition (pour une moyenne de 8 h/jour) et enfin le groupe d'appartenance d'un point de vue de la sécurité et le PRG₁₀₀. Le tableau 2.8 donne les valeurs des PRG correspondant à d'autres sources que le GIEC AR4. Le PAO des HCFC sera présenté dans le tableau 1.5 et la limite pratique (LP) mentionnée dans le tableau 2.16.

Le tableau suivant donne les valeurs de quelques propriétés physiques et de sécurité des principaux fluides frigorigènes discutés dans cet ouvrage.

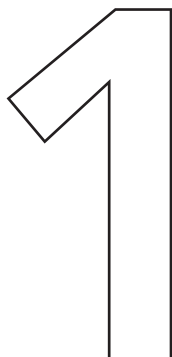
Fluide		Masse molaire	T _{eb} ⁽¹⁾ °C	T _c ⁽²⁾ °C	LII ⁽³⁾ %	ΔH ⁽⁴⁾ MJ/kg	VME ⁽⁵⁾ ppm _v	Groupe	PRG ₁₀₀ ⁽⁶⁾
R-22 ⁽⁷⁾	Chlorodifluorométhane	86,47	-40,8	96,1	aucune	2,2	1 000	A1	1 810
R-32	Difluorométhane	68,48	-51,7	78,1	14,4	9,4	1 000	A2L	675
R-125	Pentafluoroéthane	120,02	-48,1	66	aucune	-1,5	1 000	A1	3500
R-134a	1,1,1,2-Tétrafluoroéthane	102,03	-26,1	101,1	aucune	4,2	1 000	A1	1430
R-152a	1,1-Difluoroéthane	66,05	-24	113,3	4,8	17,4	1 000	A2	124
R-404A	R125/143a/134a (44/52/4)	97,6	-46,2	72	aucune	-6,6	1 000	A1	3 900
R-407C	R-32/125/134a (23/25/52)	86,2	-43,6	86	aucune	-4,9	1 000	A1	1 800
R-410A	R-32/125 (50/50)	72,58	-51,4	160,5	aucune	-4,4	1 000	A1	2 100
R-1234yf	2,3,3,3-tétrafluoroprop-1-ène	114,04	-29,5	94,7	6,2	10,7	500	A2L	4
R-1234ze(E)	HFC _{ins} tétrafluoropropène	114,04	-19	109,4	7,6				6
R-717	Naturel Ammoniac	17,03	-33,3	132,3	16,7	22,5	25	B2L	0
R-718	Naturel Eau	18,02	100	373,9	aucune			A1	0
R-744	Naturel Dioxyde de carbone	44,01		31	aucune		5 000	A1	1
R-1270	HC Propylène	42,08	-47,6	91,1	2,7		500	A3	1,8
R-290	HC Propane	44,1	-42,1	96,7	2,1	50,4	1 000	A3	3,3
R-600a	HC Isobutane	58,12	-11,7	134,7	1,6	49,4	1 000	A3	4

Valeurs de quelques propriétés physiques et de sécurité des principaux fluides frigorigènes détaillés dans cet ouvrage

1. Température d'ébullition à pression atmosphérique
2. Température critique
3. Limite inférieure d'inflammabilité
4. Chaleur de combustion
5. Valeur limite moyenne d'exposition (moyenne de 8 h/jour)
6. Les valeurs des PRG₁₀₀ des HFC et HCFC sont celles données par le GIEC AR4 (pour d'autres estimations, voir le tableau 2.8) ; celles des hydrocarbures sont des valeurs indirectes provenant de l'OMM ; celles des HFC insaturés (OMM)
7. Le R-22 est le seul fluide du tableau dont le PAO n'est pas nul, il vaut 0,055



**GÉNÉRALITÉS SUR LES
FLUIDES FRIGORIGÈNES**



Contexte et enjeux

L'histoire du froid a été marquée par des évolutions importantes et de grandes ruptures dans l'utilisation des fluides frigorigènes. Cette histoire continue à s'écrire sous nos yeux et d'autres ruptures se préparent, c'est la raison pour laquelle l'industrie frigorifique doit se préparer aux évolutions à venir et anticiper plutôt que s'opposer à ces changements irréversibles.

1.1 Des fluides naturels aux HFC : une longue histoire

1.1.1 Les débuts du froid artificiel

Dans son ouvrage sur l'histoire du froid artificiel¹, R. Thévenot fait commencer cette histoire à 1755, (date à laquelle William Cullen a mis au point un appareil de laboratoire produisant de la glace artificielle par vaporisation d'eau sous pression réduite), époque qu'il qualifie de « protohistoire du froid ». Il faudra cependant attendre un siècle pour passer de cette étape de laboratoire à des développements industriels. Les différents systèmes industriels de production du froid sont, en effet, inventés à partir de 1850 :

- ▶ la machine à compression mécanique de vapeurs liquéfiables développée par Harrison en 1856 permet de mettre au point des systèmes frigorifiques à compression en 1866 pour le dioxyde de carbone (CO₂), en 1873 pour l'ammoniac (NH₃), en 1874 pour le dioxyde de soufre (SO₂) et en 1878 pour le chlorure de méthyle (CH₃Cl) ;
- ▶ la machine à absorption ammoniac-eau est inventée en 1859 par Ferdinand Carré ;
- ▶ la machine à cycle à air est développée par Kirk (1862), Windhausen (1869) et Gifford (1870) ;

1. Roger Thévenot, *Essai pour une histoire du froid artificiel dans le monde* (1978), IIF éditeur.

- ▶ enfin Edmond Carré met au point une machine à vaporisation d'eau sous vide en 1866.

Les jalons étaient plantés mais c'est à partir de 1875, après les percées en thermodynamique consécutives aux travaux, entre autres, de Carnot (1824), Clausius (1850), Joule et Mayer que les quatre filières présentées plus haut prennent leur essor industriel.

Les fluides frigorigènes mentionnés précédemment, à savoir :

- ▶ le CO₂, l'ammoniac, le SO₂, le chlorure de méthyle et l'eau pour la compression mécanique de vapeurs ;
- ▶ l'air pour le cycle à air ;
- ▶ et l'ammoniac pour l'absorption ;

vont perdurer, sans concurrence réelle, jusqu'au début du xx^e siècle.

Mais, certains de ces fluides, qualifiés maintenant de fluides naturels, n'étaient pas de manipulation très aisée. L'ammoniac est toxique et inflammable, le SO₂ est toxique, le CO₂ requiert des pressions élevées, l'eau exige un vide de qualité. C'est la raison pour laquelle, dans les années 1920, Carrier, qui venait de créer son entreprise qui deviendra rapidement un fleuron du secteur du conditionnement d'air, s'est mis en quête d'un fluide frigorigène ininflammable, non toxique et inodore (ou à tout le moins non irritant). Il tente plusieurs essais, non convaincants, avec notamment le dichloroéthylène (C₂H₂Cl₂), et le dichlorométhane (CH₂Cl₂).

1.1.2 La première rupture : la découverte des fluides halogénés comme fluides frigorigènes

Les inventeurs de l'utilisation des fluides halogénés comme fluides frigorigènes sont Th. Midgley et A.L. Henne¹, du laboratoire de Frigidaire à Dayton USA, qui recommandent l'utilisation de composés organiques fluorés (notamment du dichlorodifluorométhane CCl₂F₂ qui deviendra le R-12²) qui sont « ininflammables, non toxiques, inodores et dont les points d'ébullition sont adaptés aux applications frigorifiques ». Suite à ces travaux, Carrier choisit d'abord le R-11 (CFCl₃) en 1933 avant d'opter ultérieurement pour le R-12. Le grand saut vers les fluides halogénés est franchi et marquera l'histoire des fluides frigorigènes jusqu'à nos jours.

La première rupture qui va bouleverser l'industrie du froid s'est produite à l'occasion de cette découverte et de sa rapide transposition dans le monde industriel. Après le

1. Th. Midgley et A.L. Henne, « Organic fluorides as refrigerants », *Industrial and Engineering Chemistry*, (1930), 22, pp. 542-545.

2. La nomenclature des fluides frigorigènes qui suit la norme ISO 817 est présentée en début d'ouvrage.