

# **Les Esters Phosphates**

**Fluides hydrauliques**

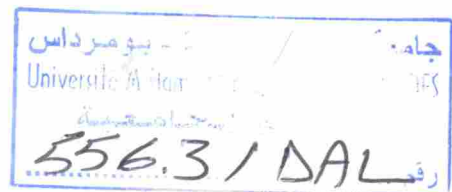
**Gérard Dallemagne**

**Cépaduès**  
ÉDITIONS



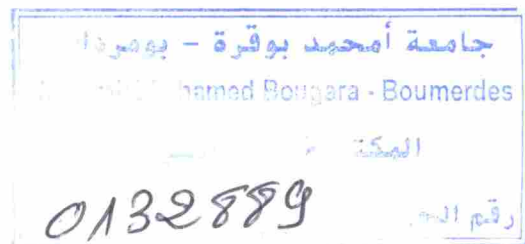
# Les Esters Phosphates

## Fluides hydrauliques



Gérard DALLEMAGNE

Expert scientifique & Ingénieur de recherche  
Retraité du Centre Commun de Recherche EADS – Département « Matériaux ».



CÉPADUÈS-ÉDITIONS

111, rue Nicolas Vauquelin  
31100 Toulouse – France

Tél. : 05 61 40 57 36 – Fax : 05 61 41 79 89

[www.cephadues.com](http://www.cephadues.com)

Courriel : [cephadues@cephadues.com](mailto:cephadues@cephadues.com)

Coordonnées GPS en WGS 84

N 43° 34'43,2"

E 001° 24'21,5"

# LES ESTERS PHOSPHATES

## Fluides hydrauliques

par Gérard Dallemagne

Expert scientifique & Ingénieur de recherche

Retraité du Centre Commun de Recherche EADS – Département « Matériaux ».

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. INTRODUCTION – HISTORIQUE.....</b>                                  | <b>9</b>   |
| <b>2. CHIMIE &amp; PRÉPARATION.....</b>                                   | <b>17</b>  |
| 2.1. Esters triarylphosphates.....                                        | 19         |
| 2.2. Esters trialkylphosphates.....                                       | 24         |
| 2.3. Esters arylalkylphosphates.....                                      | 27         |
| <b>3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DES FLUIDES HYDRAULIQUES DE BASE.....</b>      | <b>29</b>  |
| 3.1. Stabilité thermique.....                                             | 29         |
| 3.2. Résistance à l'oxydation.....                                        | 39         |
| 3.3. Stabilité à l'hydrolyse.....                                         | 57         |
| <b>4. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES FLUIDES HYDRAULIQUES DE BASE.....</b>      | <b>61</b>  |
| 4.1. Masse volumique.....                                                 | 61         |
| 4.2. Viscosités, indice de viscosité et point d'écoulement.....           | 62         |
| 4.2.1. <i>Esters triarylphosphates</i> .....                              | 63         |
| 4.2.2. <i>Esters trialkylphosphates</i> .....                             | 64         |
| 4.2.3. <i>Esters arylalkylphosphates</i> .....                            | 64         |
| 4.3. Caractéristiques à basse température.....                            | 66         |
| 4.4. Résistance au feu.....                                               | 66         |
| 4.5. Volatilité.....                                                      | 72         |
| 4.6. Propriétés thermodynamiques.....                                     | 79         |
| 4.7. Compressibilité.....                                                 | 100        |
| <b>5. PROPRIÉTÉS DE PERFORMANCE DES FLUIDES HYDRAULIQUES DE BASE.....</b> | <b>101</b> |
| 5.1. Propriétés lubrifiantes.....                                         | 101        |
| 5.2. Propriétés de moussage.....                                          | 104        |
| 5.3. Propriétés de solvant.....                                           | 104        |
| 5.4. Corrosion.....                                                       | 105        |
| 5.5. Stabilité chimique.....                                              | 105        |
| 5.6. Propriétés diverses.....                                             | 106        |
| <b>6. ADJUVANTS.....</b>                                                  | <b>111</b> |
| 6.1. Améliorateurs d'indice de viscosité.....                             | 114        |
| 6.2. Régulateurs d'acidité.....                                           | 116        |
| 6.3. Stabilisateurs d'hydrolyse.....                                      | 117        |
| 6.4. Anti-oxydants.....                                                   | 117        |
| 6.5. Passivateurs de métaux.....                                          | 119        |
| 6.6. Inhibiteurs d'érosion.....                                           | 119        |
| 6.7. Inhibiteurs de corrosion de métaux.....                              | 121        |
| 6.8. Antimoussage.....                                                    | 122        |
| 6.9. Colorants.....                                                       | 123        |

|                                                                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES FLUIDES HYDRAULIQUES ESTERS PHOSPHATES FORMULES COMMERCIALEMENT.....</b>                                       | <b>125</b> |
| 7.1. Masse volumique.....                                                                                                                             | 126        |
| 7.1.1. Identification de la masse volumique $\rho$ .....                                                                                              | 126        |
| 7.1.2. Influence de la température à pression atmosphérique.....                                                                                      | 133        |
| 7.1.3. Influence de la pression et de la température simultanément.....                                                                               | 138        |
| 7.1.4. Modélisation des relations « $\rho-T-P$ » des fluides hydrauliques esters phosphates.....                                                      | 154        |
| 7.1.5. Discussion – Conclusions.....                                                                                                                  | 157        |
| 7.2. Viscosités absolues cinématique $\nu$ et dynamique $\eta$ .....                                                                                  | 158        |
| 7.2.1. Influence de la température $T$ à pression atmosphérique.....                                                                                  | 158        |
| 7.2.2. Viscosité absolue cinématique $\nu$ .....                                                                                                      | 159        |
| 7.2.3. Viscosité absolue dynamique $\eta$ .....                                                                                                       | 163        |
| 7.2.4. Energie d'activation thermique viscosimétrique $E_v$ , $E_\eta$ .....                                                                          | 163        |
| 7.2.5. Influence de la pression $P$ .....                                                                                                             | 173        |
| 7.2.6. Modélisation des relations « $\eta-T-P$ » des fluides hydrauliques esters phosphates.....                                                      | 193        |
| 7.2.7. Discussion – Conclusions.....                                                                                                                  | 195        |
| 7.3. Modules de compressibilité isothermes et adiabatiques.....                                                                                       | 197        |
| 7.3.1. Définition du module de compressibilité, « Bulk Modulus ».....                                                                                 | 197        |
| 7.3.2. Compressibilité isotherme.....                                                                                                                 | 197        |
| 7.3.3. Module d'élasticité volumique, $K$ .....                                                                                                       | 198        |
| 7.3.4. Compressibilité adiabatique, ou isentropique, ou dynamique.....                                                                                | 199        |
| 7.3.5. Module de compressibilité sonique, $\beta_{us}$ .....                                                                                          | 203        |
| 7.3.6. Incidence d'occlusion d'air.....                                                                                                               | 203        |
| 7.3.7. Relations « $\beta-T-P$ » des fluides hydrauliques.....                                                                                        | 204        |
| 7.3.8. Définition d'un dispositif expérimental.....                                                                                                   | 205        |
| 7.3.9. Influence de la pression et de la température simultanément.....                                                                               | 212        |
| 7.4. Occlusion d'air – Moussage – Vitesse de désaération du fluide hydraulique.....                                                                   | 214        |
| 7.4.1. Propriétés antimoussage.....                                                                                                                   | 215        |
| 7.4.2. Vitesse de désaération.....                                                                                                                    | 216        |
| 7.5. Chaleur spécifique à pression constante $C_p$ .....                                                                                              | 217        |
| 7.5.1. Identification de la $C_p$ anisotherme à pression atmosphérique en DSC standard.....                                                           | 218        |
| 7.5.2. Identification de la $C_p$ anisotherme à isobare 1 MPa en PDSC standard avec cellule de mesure HP.....                                         | 222        |
| 7.5.3. Températures et enthalpie de vaporisation.....                                                                                                 | 229        |
| 7.6. Coefficient volumique de dilatation thermique $\alpha$ .....                                                                                     | 233        |
| 7.7. Conductivité thermique $\lambda$ .....                                                                                                           | 234        |
| 7.8. Récapitulatif du comportement des principales propriétés physiques des fluides hydrauliques en fonction de la température et de la pression..... | 234        |
| 7.9. Érosion électrochimique.....                                                                                                                     | 234        |
| 7.9.1. Mécanismes d'érosion électrochimique.....                                                                                                      | 235        |
| 7.9.1.1. Théorie de l'érosion électrochimique.....                                                                                                    | 236        |
| 7.9.1.2. Mécanismes d'électrodéposition cathodique du cuivre.....                                                                                     | 249        |
| 7.9.1.3. Autres mécanismes d'érosion électrochimique.....                                                                                             | 254        |
| 7.9.2. Facteurs susceptibles d'entraîner la corrosion des aciers.....                                                                                 | 258        |
| 7.9.2.1. L'oxygène.....                                                                                                                               | 258        |

|                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.9.2.2. Le chlore.....                                                                  | 259        |
| 7.9.2.3. Les ions cuivriques ( $Cu^{2+}$ ).....                                          | 260        |
| 7.9.3. <i>Études électrochimiques expérimentales</i> .....                               | 260        |
| 7.9.3.1. Complément d'étude électrochimique.....                                         | 268        |
| 7.9.4. <i>Érosion électrochimique en fonctionnalité hydraulique sur banc</i> .....       | 273        |
| 7.9.5. <i>Conclusions des deux études expérimentales</i> .....                           | 288        |
| 7.10. Stabilité thermique.....                                                           | 290        |
| 7.11. Stabilité à l'hydrolyse.....                                                       | 320        |
| 7.12. Résistance à l'oxydation.....                                                      | 323        |
| 7.13. Durée de vie des fluides hydrauliques esters phosphates.....                       | 324        |
| 7.14. Caractéristiques de miscibilité, de solubilité et de compatibilité.....            | 327        |
| 7.14.1. <i>Miscibilité et Solubilité</i> .....                                           | 327        |
| 7.14.2. <i>Compatibilité</i> .....                                                       | 329        |
| 7.14.2.1. Compatibilité avec les métaux.....                                             | 330        |
| 7.14.2.2. Compatibilité avec les matériaux organiques<br>macromoléculaires.....          | 335        |
| 7.14.2.3. Compatibilité avec les peintures, revêtements et vernis.....                   | 337        |
| 7.14.2.4. Compatibilité avec les élastomères et garnitures d'étanchéité<br>(joints)..... | 338        |
| 7.14.2.5. Compatibilité avec les produits d'étanchéité structuraux.....                  | 353        |
| 7.14.2.6. Compatibilité avec les adhésifs structuraux.....                               | 354        |
| 7.14.2.7. Compatibilité avec les composites à matrice organique.....                     | 354        |
| 7.14.2.8. Compatibilité avec les équipements électriques.....                            | 357        |
| 7.14.2.9. Compatibilité avec les marquages électriques.....                              | 357        |
| <b>8. APPLICATIONS.....</b>                                                              | <b>359</b> |
| 8.1. Fluides hydrauliques industriels.....                                               | 359        |
| 8.2. Fluides hydrauliques militaires.....                                                | 359        |
| 8.3. Fluides hydrauliques aéronautiques.....                                             | 359        |
| 8.4. Fluides de contrôle électrohydraulique.....                                         | 360        |
| 8.5. Lubrifiants.....                                                                    | 360        |
| <b>9. OPÉRATIONS DE MAINTENANCE DES SYSTÈMES HYDRAULIQUES<br/>ESTERS PHOSPHATES.....</b> | <b>363</b> |
| <b>10. TOXICOLOGIE DES FLUIDES HYDRAULIQUES ESTERS<br/>PHOSPHATES.....</b>               | <b>367</b> |
| <b>11. ÉPILOGUE.....</b>                                                                 | <b>369</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                                | <b>373</b> |



Les fluides hydrauliques sont : « le sang de l'avion ». Ce sont des vecteurs de force. Le fluide hydraulique est souvent répertorié comme un liquide fonctionnel. Il faut entendre par là un fluide sans lequel la machine ne peut fonctionner.

La principale fonction du fluide hydraulique, dans un système hydraulique, est de transmettre une force appliquée en un point à un autre point. L'effort doit pouvoir être transmis rapidement et avec précision, assurant, à distance, le passage des consignes de commandes de vol aux équipements asservis hydrauliquement : volets, ailerons, gouvernails de direction et de profondeur, trains d'atterrissage, freins aérodynamiques, tuyère d'éjection et reverse, etc., de l'aéronef. Pour accomplir, avec satisfaction, sa fonction, le fluide hydraulique doit pouvoir s'écouler aisément dans des conditions de pression et de température les plus variées et être aussi incompressible que possible.

Par ailleurs, il faut que les conditions de service soient optimales et que les coûts d'exploitation soient raisonnables.

Le « fluide hydraulique idéal » n'existe, bien sûr, que pour les besoins de calculs. Dans la pratique, il doit être adapté à l'emploi pour lequel il est requis et le choix final est le résultat d'un compromis où force est de tenir compte des principaux facteurs. Généralement, on définit 21 caractéristiques, ou qualités, qu'il y a lieu de prendre en considération. Pour accomplir ses fonctions primordiales, il est demandé, au fluide hydraulique, avant tout, une bonne stabilité thermique et, par la suite, un bon pouvoir lubrifiant, une bonne courbe de viscosité, un bon facteur de compressibilité et une bonne résistance à l'oxydation. Il est bien certain que la résistance au feu est une caractéristique utile pour un fluide hydraulique qui fonctionne sous haute pression et, en particulier, dans un circuit hydraulique avion où il circule en tous les points de la structure.

### **Chez le même éditeur :**

• *Turbulences en mécanique des fluides*

P. CHASSAING

• *Mécanique des fluides*

P. CHASSAING

• *Introduction à la dynamique des structures*

Y. GOURINAT

