

Le CO₂ supercritique et ses applications industrielles

Stéphane Sarrade et Karima Benaïssi

Résumé Le CO₂ supercritique a de nombreuses applications industrielles dans des domaines aussi variés que l'agroalimentaire, la cosmétique, la pharmaceutique ou encore les matériaux. Les procédés utilisant le CO₂ supercritique s'adressent entre autres à l'extraction, l'imprégnation, la formulation, la stérilisation et le nettoyage.

Mots-clés CO₂ supercritique, dioxyde de carbone, industrie, procédés, extraction, imprégnation, stérilisation, formulation, nettoyage.

Abstract **Supercritical CO₂ and its industrial applications**
Supercritical CO₂ has industrial applications in a wide range of areas including food, cosmetics, pharmaceuticals and materials. Supercritical CO₂ based processes include extraction, impregnation, formulation, sterilization and cleaning among others.

Keywords **Supercritical CO₂, carbon dioxide, industry, processes, extraction, impregnation, sterilization, formulation, cleaning.**



Quelques exemples de procédés industriels faisant intervenir le CO₂ supercritique.
Photo café : © Wikimedia.com/Julius Schorzman ; arôme : © BienManger.com ; bouchons : © Diam Bouchage ; textiles : © FeyeCom.

L'intérêt croissant porté aux questions environnementales a permis l'émergence de solutions innovantes s'engageant définitivement dans le développement durable. Ainsi les procédés chimiques respectant les douze principes fondateurs de la « chimie verte » [1-2] (voir encadré 1) ont connu un remarquable essor au cours de ces vingt dernières années. Les fluides supercritiques en sont l'exemple idéal, illustré maintenant par de nombreux apports dans notre vie quotidienne.

Mais d'abord, qu'est-ce qu'un fluide supercritique ?

Au-delà d'une pression et d'une température dites « critiques », un fluide donné se trouve en phase « supercritique » (figure 1). Il présente alors un comportement intermédiaire entre celui de l'état liquide et de l'état gazeux. Cela lui confère des propriétés particulières : une masse volumique élevée comparable à celle des liquides, un coefficient de diffusivité intermédiaire à celui des liquides et des gaz, et une faible viscosité proche de celle des gaz.

Le dioxyde de carbone est le fluide supercritique le plus utilisé car il présente des avantages notables : il est non toxique, non polluant, non inflammable, et est largement disponible à haute pureté et à des coûts modérés. De plus, ses

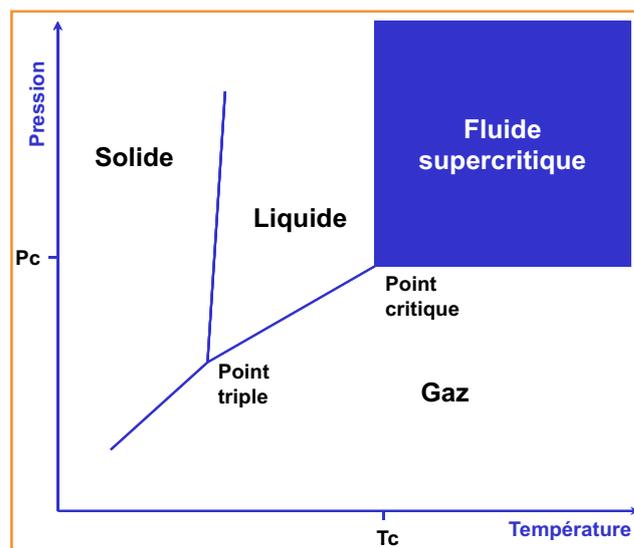


Figure 1 - Diagramme de phases d'un corps pur.

coordonnées critiques sont modérées (température critique Tc = 31 °C, pression critique Pc = 73,8 bar), ce qui en fait un solvant « vert » ayant des applications industrielles tout à fait innovantes [2].

Encadré 1**Les douze principes de la « chimie verte » [1-2]**

Ce concept a été introduit en 1998 par les chimistes américains Paul T. Anastas et John C. Warner appartenant à l'Environmental Protection Agency (EPA) [1]. Les douze principes fondateurs de la « chimie verte » visent à :

1. La prévention de la pollution à la source en évitant la production de résidus.
2. L'économie d'atomes et d'étapes qui permet de réaliser, à moindre coût, l'incorporation de fonctionnalités dans les produits recherchés tout en limitant les problèmes de séparation et de purification.
3. La conception de synthèses moins dangereuses grâce à l'utilisation de conditions douces et la préparation de produits peu ou pas toxiques pour l'homme et l'environnement.
4. La conception de produits chimiques moins toxiques avec la mise au point de molécules plus sélectives et non toxiques impliquant des progrès dans les domaines de la formulation et de la vectorisation des principes actifs et des études toxicologiques à l'échelle cellulaire et au niveau de l'organisme.
5. La recherche d'alternatives aux solvants polluants et aux auxiliaires de synthèse.
6. La limitation des dépenses énergétiques avec la mise au point de nouveaux matériaux pour le stockage de l'énergie et la recherche de nouvelles sources d'énergie à faible teneur en carbone.
7. L'utilisation de ressources renouvelables à la place des produits fossiles. Les analyses économiques montrent que les produits issus de la biomasse représentent 5 % des ventes globales de produits chimiques et pourraient atteindre 10 à 20 % en 2010 (d'après les données de 1998, [1] p. 30). Plus de 75 % de l'industrie chimique globale aurait alors pour origine des ressources renouvelables.
8. La réduction du nombre de dérivés en minimisant l'utilisation de groupes protecteurs ou auxiliaires.
9. L'utilisation des procédés catalytiques de préférence aux procédés stœchiométriques avec la recherche de nouveaux réactifs plus efficaces et minimisant les risques en terme de manipulation et de toxicité. La modélisation des mécanismes par les méthodes de la chimie théorique doit permettre d'identifier les systèmes les plus efficaces à mettre en œuvre (incluant de nouveaux catalyseurs chimiques, enzymatiques et/ou microbiologiques).
10. La conception des produits en vue de leur dégradation finale dans des conditions naturelles ou forcées de manière à minimiser l'incidence sur l'environnement.
11. La mise au point des méthodologies d'analyses en temps réel pour prévenir la pollution, en contrôlant le suivi des réactions chimiques. Le maintien de la qualité de l'environnement implique une capacité à détecter, et si possible à quantifier, la présence d'agents chimiques et biologiques réputés toxiques à l'état de traces (échantillonnage, traitement et séparation, détection, quantification).
12. Le développement d'une chimie fondamentalement plus sûre pour prévenir les accidents, explosions, incendies et émissions de composés dangereux.

Les premiers développements industriels utilisant des fluides supercritiques apparaissent au début des années 1970 [3]. Le principe de l'extraction de solides utilisant le dioxyde de carbone supercritique (CO₂ SC) repose sur la forte variation du pouvoir solvant du CO₂ en fonction des conditions opératoires (température et pression), ce qui permet d'extraire sélectivement les molécules selon leur nature chimique. Très faiblement polaire, le CO₂ se révèle être un excellent solvant des molécules apolaires ou peu polaires dans les conditions supercritiques [3]. Partant de ce principe, une fois le composé désiré dissous dans le milieu CO₂ SC, il sera aisé d'obtenir l'extrait pur par une simple dépressurisation qui entraîne alors la séparation du CO₂, redevenu

gazeux, et de l'extrait, récupéré sous forme liquide ou solide. Les procédés supercritiques s'acquittent des opérations d'élimination des résidus de solvant (extraction, imprégnation, formulation), opérations indispensables lorsque ce solvant est un composé organique. De plus, les faibles températures mises en œuvre (en général de 40 à 60 °C) permettent de conserver l'intégrité chimique des molécules thermosensibles traitées [2].

Utilisations dans l'agroalimentaire

L'utilisation la plus ancienne et la plus développée à l'échelle industrielle du CO₂ SC est celle de solvant d'extraction de produits naturels, notamment dans le secteur agroalimentaire (figure 2) [4].



Crédit photo : Serge Chapuis.

Figure 2 - Pilote d'extraction par CO₂ SC de substances naturelles IFS (voir encadré 2 page 76).

Le café décaféiné

Pour la décaféination du café, du CO₂ SC est introduit dans l'extracteur contenant les grains de café. Une première extraction au CO₂ SC permet de récupérer l'ensemble des arômes. Puis lors d'une seconde extraction, la caféine, soluble dans le CO₂ SC en présence d'eau, est extraite puis récupérée « pure » (avec un rendement de 99,5 %) en sortie de l'extracteur suite à l'évaporation du CO₂ à température ambiante [5]. Le café ainsi décaféiné est aromatisé avec l'extrait obtenu lors du premier traitement. Du fait des faibles températures mises en œuvre et de l'absence de solvant organique, il présente un profil aromatique complet. La société Maxwell (États-Unis) décaféine ainsi 80 000 tonnes de grains de café par an. De son côté, la caféine extraite est revendue aux industries pharmaceutiques ou alimentaires. Il n'y a donc que très peu de déchets formés à l'issue de ce procédé, le rendant économiquement et écologiquement viable depuis maintenant une trentaine d'années [3].

Les arômes et colorants naturels

Actuellement, la demande des consommateurs porte essentiellement sur l'utilisation de produits naturels en lieu et place des additifs de synthèse. Ainsi, l'extraction d'arômes à partir de produits naturels (vanille, thym, épices) s'avère particulièrement intéressante. Dans certains cas, comme par exemple pour l'extraction de capsaïcine à partir de piment rouge, le rendement d'extraction est particulièrement élevé

(56,0 % massique). Par ailleurs, l'arôme obtenu par extraction au CO₂ SC peut être qualifié de « pur » dans la mesure où il est dépourvu de solvant organique et où les conditions d'extraction permettent de maîtriser sa composition [6]. Les rendements obtenus par extraction supercritique sont, dans la plupart des cas, supérieurs à ceux obtenus par les procédés de distillation conventionnels (par solvants organiques ou hydrodistillation), et ce principalement en raison du fait que les extraits obtenus par extraction supercritique contiennent des composés actifs en concentration plus élevée et sont exempts de résidus de solvants indésirables.

L'élimination de pesticides

De même que l'extraction par CO₂ supercritique permet d'obtenir des extraits de haute valeur ajoutée, elle peut permettre de retirer un composé indésirable de manière sélective et propre. Cela apparaît très pertinent lorsque les composés dont on veut se débarrasser peuvent avoir une influence sur la santé du consommateur. C'est le cas des pesticides organophosphorés ou organochlorés, solubles dans le CO₂ SC et donc aisément extraits par de tels procédés. Des applications permettent ainsi, par exemple, d'éliminer ces pesticides dans les produits agricoles [7]. Une large gamme de pesticides (pyréthroïdes, carbinols, organophosphorés, organochlorés...) peut en effet être extraite par extraction supercritique à partir de divers fruits, légumes et céréales en quelques heures. On peut par exemple citer la cyperméthrine, un insecticide qui peut être récupéré avec un rendement de 89 % à partir de farine de blé, ou encore le bromopropylate, un acaricide qui peut être extrait avec un rendement de 98 % à partir de tomates.

L'extraction de lipides

Sur le même principe, le CO₂ SC s'avère un allié de la diététique ou de la nutraceutique, par exemple lorsqu'il s'agit de retirer les lipides des jaunes d'œufs ou pour obtenir des fractions de matière grasse du lait sans cholestérol. La combinaison de l'utilisation du CO₂ supercritique pour ses propriétés de stérilisation et pour l'extraction des lipides a d'ailleurs été exploitée par une équipe de recherche universitaire et fait l'objet d'une commercialisation de boissons et céréales « biodiététiques » en Corée du Sud [8].

Des bouchons « sans goût de bouchon »

N'oublions pas de citer le trichloroanisole, molécule largement détestée des amateurs de vin. En effet, contenue naturellement dans le liège qui constitue le bouchon des bouteilles, elle peut contaminer le vin et altérer ses propriétés organoleptiques dès lors que 5 ng/g y sont présents. Cela mène inévitablement à ce que l'on appelle « le goût de bouchon ». La société française Diam Bouchage extrait cette molécule dans le liège grâce à l'utilisation du CO₂ SC [9] et propose ainsi des bouchons Diam® « garantis sans goût de

bouchon » aux viticulteurs. Elle produit déjà plus d'un milliard de bouchons par an (figure 3).

Du biodiesel à partir d'algues

L'utilisation des algues comme sources alternatives de « fuel » connaît une forte croissance. L'augmentation du prix du fuel issu de l'industrie pétrochimique, la crainte d'un épuisement en ressources pétrolières ainsi que les différents désastres environnementaux qui ont eu lieu ces dernières années ont accru la sensibilité des pouvoirs publics et des consommateurs au développement de sources d'énergie alternatives. Le CO₂ SC se présente alors comme un solvant de choix pour l'extraction d'huiles (biofuel) à partir de microalgues. L'absence d'utilisation de solvants organiques permet de garantir l'obtention d'un biofuel parfaitement biodégradable [10]. Récemment installée aux îles Canaries (dont les côtes sont riches en algues), la société CleanAlgae utilise les technologies des fluides supercritiques pour produire des biofuels (et autres principes actifs) à partir d'algues. Les rendements d'extraction en triglycérides (biohuiles) obtenus par extraction au CO₂ SC de microalgues sont de l'ordre de 100 %. En plus de permettre une extraction particulièrement efficace des triglycérides, l'extraction par CO₂ SC est également sélective puisqu'elle aboutit à une faible extraction en composés indésirables pour la production de biocarburants tels que les pigments (dont les rendements d'extraction par CO₂ SC n'excèdent pas 15 % dans les cas les plus défavorables) et les phospholipides (qui ne sont pas extraits) contrairement aux procédés d'extraction traditionnels.



Figure 3 - Unités d'extraction par CO₂ SC de Diam Bouchage.

être extraites sélectivement par CO₂ SC. Les rendements varient d'un composé à l'autre, mais on peut noter par exemple que l'extraction supercritique de lycopène à partir de tomate peut être obtenue avec des rendements de l'ordre de 85 % lorsque l'on utilise du CO₂ SC pur (et peut même atteindre 100 % de rendement en présence de co-solvant). Par ailleurs, de par l'absence de traces de solvants organiques, les textures mêmes des extraits obtenus (de thym, romarin, lavande, camomille...) correspondent mieux aux exigences des formulations cosmétiques que les procédés dits « conventionnels » [11].

Des médicaments « purs » sans résidus toxiques

Dans le secteur pharmaceutique, les huiles obtenues sur certaines plantes médicinales traitées par CO₂ SC peuvent



Figure 4 - Unité de formation de poudres pharmaceutiques par CO₂ SC des laboratoires Pierre Fabre.

être particulièrement riches en molécules bioactives. Dans le spectre des extraits obtenus à partir de plantes, on peut citer les diterpènes (antioxydants), les triterpènes (phytostérols) ou encore les tétraterpènes (carotènes) qui peuvent présenter un intérêt pour le secteur pharmaceutique [12]. Le CO₂ SC peut également intervenir pour l'élaboration de poudres fines, en particulier pour la formulation de principes actifs. Le recours aux procédés supercritiques permet en particulier de contourner les problèmes liés à l'utilisation de solvants, de limiter les effets secondaires, mais également de limiter les rejets de molécules actives qui entraînent aujourd'hui les problèmes de micropolluants dans les milieux naturels [13].

Ainsi, la société Pierre Fabre, qui développe l'élaboration de poudres par CO₂ SC (figure 4), a reçu en 2009 le prix Pierre Potier « pour l'innovation en chimie en faveur du développement durable », récompensant son procédé Formulplex® (qui utilise entre autres du CO₂ SC pour augmenter la biodisponibilité des principes actifs) [13].

Des polymères biodégradables et biocompatibles

Dans le domaine des plastiques, la diffusion du CO₂ SC dans les polymères s'accompagne d'un gonflement de ces matériaux ainsi que d'une modification de leurs propriétés physico-chimiques. Le CO₂ SC est en particulier un bon agent plastifiant car il diminue la température de transition vitreuse. Les fluides supercritiques sont également adaptés à l'imprégnation de prothèses de hanche ou de genou qui les rendra plus résistantes au cours du temps [14]. Les propriétés du polymère obtenu sont ainsi améliorées (résistance, stabilité thermique, pureté). La société Critical Pharmaceuticals qui a vu le jour au Royaume-Uni en 2002 propose des matériaux polymères biocompatibles et biodégradables (copolymères d'acide polylactique et de polyméthylméthacrylate, PLA/PMMA) synthétisés en milieu CO₂ SC pour des applications médicales et pharmaceutiques [15].

L'imprégnation supercritique

Le principe consiste en un balayage d'un matériau solide poreux (polymères, bois, textiles...) par du CO₂ SC dans lequel la substance active à imprégner est préalablement dissoute. Cette étape est suivie d'une détente qui provoque le passage du CO₂ à l'état gazeux, laissant le matériau

« cible » imprégné de la substance active. Ainsi, imprégner une matrice solide avec un composé actif est aisé en utilisant une technologie basée sur l'utilisation des fluides supercritiques [16].

Imprégnation du bois par des fongicides

La société danoise Superwood traite du bois de manière industrielle afin d'imprégner celui-ci à l'aide de fongicides dissous dans le CO₂ SC (figure 5).

L'utilisation du fluide supercritique comme vecteur d'imprégnation permet ici d'imprégner le bois à cœur, garantissant ainsi une absence de moisissure et évitant les longs bains ou badigeonnages. Cela permet de limiter et donc d'économiser des quantités non négligeables de fongicides de par la capacité du CO₂ SC à rendre sa répartition homogène [17].

Tannage du cuir

Notons dans le même ordre d'idée le tannage des peaux pour les transformer en cuir par CO₂ SC, évitant ainsi l'utilisation de grandes quantités de solutions aqueuses souvent difficiles à traiter. Les sels de chrome, voire même des tanins naturels, peuvent imprégner une peau à cœur lors de l'étape qui la transformera en cuir [18].

Teinture de textiles

Dans l'industrie du textile, l'opération de teinture donne lieu à de grandes quantités d'effluents aqueux. Ce problème écologique et économique est traité lorsque le CO₂ SC est utilisé comme solvant de teinture. En effet, la possibilité de recycler la teinture par séparation aisée avec le CO₂ et l'absence d'opération de séchage (très énergivore lorsqu'on



Figure 5 - Unité d'imprégnation du bois par CO₂ SC de la société Superwood.

Encadré 2**IFS : un centre de ressources sur les fluides supercritiques**

IFS (Innovation Fluides Supercritiques) est une association loi 1901 qui a pour objectif de promouvoir l'utilisation et le transfert des technologies des fluides supercritiques du laboratoire vers l'industrie. Elle propose un véritable lieu d'échange entre experts scientifiques et utilisateurs industriels à travers notamment l'appui auprès de ses entreprises et laboratoires membres, mais aussi la mise en œuvre d'actions d'envergure nationale et internationale, et la structuration d'une base de connaissance mondiale.

IFS se positionne comme interface technique pour les entreprises afin de les informer, de les former et de les accompagner sur l'utilisation de la technologie des fluides supercritiques et sur les applications industrielles de cette technologie (agroalimentaire, cosmétique, pharmaceutique, chimie, matériaux...).

Dans le cadre de ses activités scientifiques, IFS dispose d'un pilote d'extraction par CO₂ supercritique permettant l'extraction de composés naturels (arômes, parfums, huiles, colorants...) à partir de matière première végétale (plantes aromatiques, fleurs, épices, fruits...).

L'ensemble de ces ressources permet à IFS de proposer des formations et des études exploratoires aux entreprises et laboratoires désireux de mieux appréhender les potentialités techniques et économiques des technologies supercritiques.

• www.supercriticalfluid.org

utilise un solvant aqueux) sont autant de caractéristiques favorables. D'autre part, la faible viscosité et la grande diffusivité du CO₂ SC permet une diffusion rapide et à cœur de la teinture, entraînant ainsi un gain de productivité tout en réduisant les quantités de teintures utilisées [19]. Parmi les textiles teintés par CO₂ SC, on peut citer le Kevlar® et le polypropylène qui ont pu être imprégnés de colorants rouges de façon très efficace en utilisant de faibles quantités de colorants par rapport aux procédés de teinture de textiles traditionnels. À titre d'exemple, la société néerlandaise FeyeCon, de par ses succès dans le domaine de la teinture (de polyester notamment) par CO₂ SC (procédé DyeCoo®), n'a cessé de croître depuis sa création il y a déjà vingt ans.

Le nettoyage à sec de textiles

Même si son pouvoir solvant est limité, le CO₂ SC est utilisé comme solvant de nettoyage de textile (nettoyage à sec) grâce à l'addition de tensioactifs spécifiques afin, une nouvelle fois, d'éviter l'utilisation de solvants chlorés comme le trichloréthylène. Pour des raisons environnementales, ce solvant toxique est soumis à de nombreuses limitations sanitaires et réglementaires, laissant la place à des solvants « verts » dans ce secteur. Bien que seuls des solvants de type hydrocarbures soit aujourd'hui capables de répondre à la demande du marché en substitution aux solvants chlorés, l'utilisation de CO₂ sous pression ou supercritique se présente comme une alternative industrielle aux solvants chlorés classiquement utilisés, commercialement développée notamment aux États-Unis (figure 6).

D'un point de vue technique, tout est disponible pour permettre le développement de cette technologie verte pour le nettoyage à sec de textiles dans d'autres parties du globe [20].

Conclusions

Les technologies faisant intervenir le CO₂ SC s'impliquent dans des applications très variées et en plein



Figure 6 - Cabine de nettoyage à sec de textiles par CO₂ SC aux États-Unis.

développement [21]. De nombreuses filières industrielles sont concernées telles que la cosmétique, la pharmacie, les matériaux, la chimie ou l'énergie. D'autres domaines sont en développement rapide comme le nettoyage de pièces mécaniques ou la préparation des surfaces en microélectronique [22]... Il faut noter pour l'avenir que l'eau, qui présente des coordonnées critiques plus élevées que celles du CO₂ (T_c = 374 °C, P_c = 221 bar), est néanmoins beaucoup étudiée comme milieu réactionnel, trouvant des applications en développement durable, principalement pour la valorisation et le traitement des déchets. Ces procédés sont au stade industriel en Asie [23].

Références

- [1] Anastas P.T., Warner J.C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, **1998**.
- [2] Sarrade S., *La chimie d'une planète durable*, Le Pommier, **2011**.
- [3] Williams D.F., Extraction with supercritical gases, *Chem. Eng. Sci.*, **1981**, 36, p. 1769.
- [4] Brunner G., Supercritical fluids: technology and application to food processing, *J. Food Eng.*, **2005**, 67, p. 21.
- [5] Ben-Nasr H., Coenen H., Process for the quasi-continuous decaffeination of raw coffee, Brevet US 5338575, **1994**.
- [6] Reverchon E., De Marco I., Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter, *J. Supercrit. Fluids*, **2006**, 38, p. 146.
- [7] Lehotay S.J., Supercritical fluid extraction of pesticides in foods, *J. Chromatogr. A*, **1997**, 785, p. 289.
- [8] Kim H.-J., Lee S.-B., Park K.-A., Hong I.-K., Characterization of extraction and separation of rice bran oil rich in EFA using SFE process, *Separation and Purification Technology*, **1999**, 15, p. 1.
- [9] Lumia G., Perre C., Aracil J.-M., Method for treating and extracting cork organic compounds with a dense fluid under pressure, Brevet WO 0123155, **2001**.
- [10] Tabernero A., Martín del Valle E.M., Galán M.A., Evaluating the industrial potential of biodiesel from a microalgae heterotrophic culture: Scale-up and economics, *Biochem. Eng. J.*, **2012**, 63, p. 104.
- [11] Temelli F., Perspectives on supercritical fluid processing of fats and oils, *J. Supercrit. Fluids*, **2009**, 47, p. 583.
- [12] Fornari T., Vicente G., Vázquez E., García-Risco M.R., Reglero G., Isolation of essential oil from different plants and herbs by supercritical fluid extraction, *J. Chromatogr. A*, **2012**, 1250, p. 34.
- [13] Fages J., Lochard H., Letourneau J.-J., Sauceau M., Rodier E., Particle generation for pharmaceutical applications using supercritical fluid technology, *Powder Technology*, **2004**, 141, p. 219.
- [14] Yeo S.-D., Kiran E., Formation of polymer particles with supercritical fluids: A review, *J. Supercrit. Fluids*, **2005**, 24, p. 287.
- [15] Ginty P.J., Whitaker M.J., Shakesheff K.M., Howdle S.M., Drug delivery goes supercritical, *Materials Today*, **2005**, 8, p. 42.
- [16] Masmoudi Y., Ben Azzouk L., Forzano O., Andre J.-M., Badens E., Supercritical impregnation of intraocular lenses, *J. Supercrit. Fluids*, **2011**, 60, p. 98.

- [17] Kjellow A.W., Henriksen O., Supercritical wood impregnation, *J. Supercrit. Fluids*, **2009**, *50*, p. 297.
- [18] Marsal A., Celma P.J., Cot J., Cequier M., Supercritical CO₂ extraction as a clean degreasing process in the leather industry, *J. Supercrit. Fluids*, **2000**, *16*, p. 217.
- [19] van der Kraan M., Fernandez Cid M.V., Woerlee G.F., Veugelers W.J.T., Witkamp G.J., Dyeing of natural and synthetic textiles in supercritical carbon dioxide with disperse reactive dyes, *J. Supercrit. Fluids*, **2007**, *40*, p. 470.
- [20] Worm S.L., McClain, J.B., Cleaning apparatus having multiple wash tanks for carbon dioxide dry cleaning and methods of using same, Brevet US 20030182731, **2003**.
- [21] Benaissi K., Les fluides supercritiques à votre service, *L'Act. Chim.*, **2012**, *364-365*, p. 135 (téléchargement libre, www.lactualitechimique.org/larevue_article.php?cle=2969).
- [22] Weber D.C., McGovern W.E., Moses J.M., Precision surface cleaning with supercritical carbon dioxide: Issues, experience, and prospects, *Metal Finishing*, **1995**, *93*, p. 22.
- [23] Veriansyah B., Kim J.-D., Lee J.-C., Lee Y.-W., OPA oxidation rates in supercritical water, *Journal of Hazardous Materials*, **2005**, *124*, p. 119.



S. Sarrade

Stéphane Sarrade

est directeur de recherche CEA, chef du Département de physico-chimie à la Direction de l'Énergie Nucléaire, CEA Saclay* et président d'Innovation Fluides Supercritiques (IFS)**.

Crédit photo : Pierre Maraval.

Karima Benaissi

(auteur correspondant) est responsable technique Innovation Fluides Supercritiques (IFS) (voir encadré 2)*.



K. Benaissi

* CEA DEN/DANS/DPC, Centre de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex. Courriel : stephane.sarrade@cea.fr

** Innovation Fluides Supercritiques - Rovaltain TGV, 1 rue Marc Seguin, BP 16109, Alixan, F-26958 Valence Cedex. Courriels : k.benaissi@drome.cci.fr, contact@supercriticalfluid.org www.supercriticalfluid.org



Institut de Chimie des Substances Naturelles

L'ICSN organisera son XIII^{ème} symposium

les 13 et 14 juin 2013

sur le campus du CNRS de Gif sur Yvette

Ce symposium se déroulera pendant deux jours et accueillera une large audience de scientifiques et d'étudiants en thèse. Il comprend environ treize conférences plénières données par des scientifiques invités de renommée internationale et près de 100 communications par affiche.

Le programme détaillé est consultable sur le site du symposium : <http://www.icsn.cnrs-gif.fr/symposium>

ICSN CNRS

1 avenue de la Terrasse - Bâtiment 27 91198 Gif sur Yvette cedex

Tél : (33) 1 69 82 45 93 - Fax : (33) 1 69 07 77 52

E-mail : beatrice.fixois@icsn.cnrs-gif.fr

Site web de l'ICSN : <http://www.icsn.cnrs-gif.fr>

