

Première approche de JPEG 2000

Club Photoshop

4 septembre 2003



SYLVAIN
RENARD



58, Bd Henri Dunant
Bâtiment A
91100 Corbeil-Essonnes

Tél. : 01 64 96 02 31
Mobile : 06 60 45 19 73
srenard@ruses.com
www.ruses.com
www.commentfaireunsite.com

Sylvain Renard
Formation
et réalisations multimédias

Introduction

Je m'intéresse depuis longtemps à la compression de données. Certains se souviennent peut-être des conférences que j'avais faites il y a quelques années à ce sujet et déjà à l'époque je parlais du JPEG 2000 comme d'une nouvelle norme de compression d'images qui devait être publiée très rapidement. Nous avons beaucoup attendu mais à mon avis, nous n'allons pas être déçus.

On m'a demandé de traiter du JPEG 2000 au cours de cette séance qui est également consacré à Acrobat 6. Quel est le rapport entre ces deux sujets ? Certes, Acrobat, comme tous les logiciels qui traitent l'image va lire et écrire le format JP2 mais à part cette nouveauté, les deux sujets sont assez différents et tous les deux importants.

Comment dans ces conditions traiter du JPEG 2000 ? Je crois qu'il y a **deux approches** qui viennent à l'esprit : d'abord, celle qui m'a semblé dans l'esprit de la demande. Aborder JPEG 2000 de manière pratique, utilitaire, essayer de voir comment ça marche et à quoi ça sert.

L'autre, celle qui spontanément est la mienne, celle de la vulgarisation scientifique, celle qui était la mienne dans mes conférences sur la compression de données est celle qui consiste à comprendre en profondeur ce qu'est le JPEG 2000, pourquoi cette nouvelle norme apparaît aujourd'hui, bref à replacer la norme actuelle dans son contexte scientifique, dans le contexte général de la compression de données et dans celui, encore plus vaste de l'évolution contemporaine de la théorie du signal.

Evidemment ça nous aurait mené assez loin, plus loin qu'à la Tour Montparnasse. A Auxerre peut-être, en 1781, à l'école militaire, là où vient d'arriver un jeune garçon passionné par les mathématiques qui a une curieuse habitude. Toute la journée, il ramasse tous les bouts de chandelle qu'il trouve et la nuit venue, quand tous ses condisciples sont couchés, il descend en salle d'études pour résoudre des problèmes de mathématiques. Mais laissons là ce jeune garçon, il s'appelait Joseph Fourier, nous le retrouverons peut-être une autre fois.

Dans la grande demie-heure dont je dispose pour évoquer JPEG 2000 afin que Thierry puisse nous parler sérieusement d'Acrobat 6 je vais évidemment m'en tenir à l'essentiel et à des considérations pratiques même si j'essaierai de montrer au passage qu'il y aurait beaucoup d'autres choses à dire et des choses passionnantes sur le sujet.

Je vais essayer de dire d'abord ce qu'est JPEG 2000, c'est à dire **une norme en cours de rédaction**, ensuite j'évoquerai **l'algorithme novateur** qui est à la base du JPEG 2000, j'aborderai **les principales fonctionnalités de JPEG 2000** pour terminer par cette **approche pratique** que tous le monde attend et je rendrai compte des essais que j'ai effectués.

Une norme en cours de rédaction

JPEG 2000 est donc **un nouveau système de codage d'images** qui utilise les connaissances actuelles dans le domaine de la technologie des ondelettes.

Précisons, au coeur de JPEG il y a la transformée de Fourier discrète. Au coeur de JPEG 2000, il y a une décomposition en ondelettes. Le principe même du codage est différent. JPEG 2000 n'est pas une amélioration de JPEG, il constitue une autre manière d'analyser, de décomposer l'image pour la compresser avec ou sans pertes en apportant des fonctionnalités complètement nouvelles, en particulier pour les transmissions à faible bande passante.

Cette nouvelle norme est composée de **11 parties** dont certaines sont publiées et d'autres non. Passons les en revue rapidement :

La **première partie** est publiée par l'ISO, elle définit l'**algorithme de décodage**, le **format de** ce qu'on appelle le **codestream** et le **format JP2** qui permet d'encapsuler le codestream.

La **deuxième partie** définit les **extensions** de la partie 1. C'est ici par exemple qu'on définit toutes les possibilités dans le domaine des métadonnées. Cette partie devrait paraître très rapidement.

La **troisième partie** s'appelle **Motion JPEG 2000**. Elle définit un format de codage de séquences audiovisuelles en tant que succession d'images compressées par un système respectant la partie 1 de la norme. Cette partie a été publiée, c'est une norme ISO.

La **quatrième partie** définit les règles de **compatibilité avec la norme** JPEG 2000. Elle est maintenant publiée avec une série de fichiers de test.

La **cinquième partie** est constitué de **logiciels de référence**. Sa publication est imminente; Il existe en particulier deux implémentations de JPEG 2000, l'une en C (projet Jasper), l'autre en Java (projet JJ2000).

La **sixième partie** définit un **format de fichier pour les images dites « compound »** c'est à dire composée à la fois de textes, d'images, de graphiques... Cette partie est au stade de la pré-publication.

La **septième partie** aurait dû définir un support minimal de compatibilité pour les appareils à puissance limitée. Elle a apparemment été **abandonnée** en cours de route et ne sera pas publiée.

La **huitième partie (JPSEC)**, consacrée aux problèmes de sécurité, a été lancée en décembre 2001 à Sidney. Aucune version préparatoire n'est encore publiée.

La **neuvième partie (JPIP)** consacré aux outils d'interactivité, aux API et protocoles a été lancée en mars 2003 à Séoul. Elle en discussion.

La **dixième partie, JP3D**, a été lancée en décembre 2001 à Sidney. Aucune version préparatoire n'est encore publiée.

La **onzième partie, JPWL**, a été lancée en décembre 2001 à Sidney. Aucune version préparatoire n'est encore publiée.

La **douzième partie (ISO Base Media File Format)** qui est en fait une modification de la partie trois est en cours d'élaboration.

Nous sommes donc devant une norme d'une grande ampleur dont certaines parties seulement sont publiées, **il faudra plusieurs années pour terminer ce travail**. D'autre part la norme n'est pas constituée de logiciels directement utilisables. **Un gros effort doit être fait par les industriels** pour développer les logiciels et les dispositifs matériels qui utiliseront le JPEG 2000. Mon sentiment est que cette technologie arrivera à maturité vers 2008 et qu'elle sera couramment utilisée dans la décennie qui suivra.

Un algorithme novateur

L'algorithme utilisé par JPEG 2000, en fait une succession d'algorithmes, peut se décomposer, en première analyse, comme le montre le schéma suivant :



Transformée couleur

Cette phase est optionnelle mais si l'image est en RVB on la convertit généralement dans un espace luminance/chrominance car cette représentation est plus favorable à la compression.

Transformée en ondelette discrète

C'est ici que l'algorithme de JPEG 2000 est radicalement différent de celui de JPEG. Alors que le JPEG utilisait une transformée de Fourier discrète, JPEG 2000 utilise les ondelettes. On perçoit ici, dans notre domaine, l'évolution de la théorie du signal qui s'est considérablement développée ces dernières années.

L'image subit une série de décomposition grâce à des filtres.

Pour donner une idée grossière du travail effectué on peut dire que l'image est divisée d'abord en « tuiles » de taille fixe. Chaque tuile est rééchantillonnée de manière à ce que longueur et largeur soient divisées par 2. Les informations perdues dans l'opération sont enregistrées sous forme de coefficients d'ondelettes. On recommence ensuite l'opération avec la nouvelle image et ainsi de suite tant qu'il reste des pixels.

La méthode est légèrement différente selon que l'on comprime avec ou sans perte (ce n'est pas la même ondelette qui est utilisée).

On obtient ainsi une série ordonnée de coefficients qui décrivent l'image.

Quantification

Quand on code avec pertes, la précision sur les coefficients d'ondelettes obtenus à l'étape précédente est réduite par ce qu'on appelle une quantification scalaire uniforme. Disons qu'on ne conserve qu'un ordre de grandeur plus ou moins précis des coefficients.

(Précisons que la norme permet d'affecter un pas de quantification différent à chaque sous-bande).

Si l'on code sans perte, aucune quantification n'est appliquée (le pas de quantification est égal à 1).

Codage entropique

Il s'agit maintenant d'appliquer un codage sans perte aux données obtenues. Disons pour faire bref, que JPEG utilise ce qui se fait de mieux dans le genre, ça s'appelle un codage arithmétique adaptatif avec contexte.

Allocation de débit

Il s'agit de **fabriquer les paquets de données** conformes à la norme qui seront ensuite enregistrés dans un fichier pour souvent être placés sur un serveur.

Chaque paquet va correspondre à un layer (un niveau de qualité) d'un niveau de résolution d'une composante de l'image. Il comporte un en-tête qui identifie précisément son contenu et permet l'accès facile aux données dans le codestream. Enfin on va placer ces paquets de données les uns à la suite des autres derrière un en-tête qui précisera les paramètres de codage et l'ordre des paquets dépendra du type de progression désirée (par résolution ou par layers et en tenant compte des régions d'intérêt).

Il est important de noter, même si ces possibilités ne sont pas encore exploitées, qu'il est toujours possible de modifier sur le serveur l'ordre dans lequel les paquets d'un même codestream sont envoyés vers le décodeur du client.

Notons au passage que le JPEG 2000 demande de 2 à 6 fois plus de calculs que le JPEG. Ceci peut paraître un grave inconvénient mais, loi de Moore oblige, la puissance de nos ordinateurs a été multipliée environ par 100 depuis la création du JPEG, il n'y a donc pas trop de raisons de s'inquiéter.

Des fonctionnalités complexes

Voici les différentes caractéristiques du JPEG 2000 qui en font sa spécificité et son intérêt :

1. Décodage progressif. Par nature les codestream JPEG 2000 sont à résolutions multiples. L'image s'y trouve compressée résolution par résolution sans redondance. On peut donc utiliser la résolution la plus appropriée au système d'affichage. Il est aussi possible d'ordonner l'information dans le codestream de manière croissante en qualité grâce au concept des layers ou encore de grouper l'information par rapport à la position qu'elle occupe dans une résolution de l'image.

2. Les régions d'intérêt. (ROI Region Of Interest). La norme permet une affectation hétérogène du budget de qualité d'une image. On pourra décider qu'une zone de l'image, de forme rectangulaire ou elliptique, doit être privilégiée par rapport au reste de l'image en étant reproduite avec moins de perte voire même sans pertes.

3. Codage avec ou sans pertes. Il faut insister sur le fait que le même algorithme permet de compresser avec ou sans perte. Nous verrons d'ailleurs tout à l'heure que la compression sans pertes de JPEG 2000 est très intéressante et à mon avis promise à un

grand avenir.

4. Détection d'erreurs en milieu bruité. Les codestream JPEG 2000 sont très résistants et la norme a prévu un système de détection d'erreur très efficace.

5. Accès aléatoire aux différentes zones de l'image. Il est possible de ne décoder qu'une certaine zone d'une image quand elle est très grande.

6. Traitement d'une grande variété de types d'images. La norme JPEG 2000 s'applique aux images photographiques en couleurs mais aussi aux images en niveaux gris et aux images composées de zones différentes.

7. Compatibilité avec les profils ICC. JPEG 2000 emporte des informations précises sur les couleurs et est en particulier compatible avec les profils ICC qui sont devenus incontournables dans le pré-presse.

8. Métadonnées. JPEG 2000 permet d'enregistrer des métadonnées très variées grâce à un système optionnel perfectionné.

9. Images 32 bits. JPEG 2000 contrairement à JPEG permet de traiter des images 32 bits.

10. Transparence. Contrairement à JPEG, JPEG 2000 permet d'enregistrer une image comportant de la transparence.

Première approche pratique

Nous nous sommes livrés à quelques essais en utilisant 2 logiciels disponibles actuellement sous forme de plug-ins Photoshop (utilisé ici dans sa version 7 sur Macintosh).

- **Le plug-in j2kf de fnord** (www.fnordware.com) est simple d'emploi et n'offre que peu d'options. Il est fourni en trois versions pour les utilisateurs de Mac. L'une (Hybrid) convient pour toutes les versions de Photoshop (Classic ou Carbon), c'est celle que nous avons testé. La deuxième (Carbon) convient à After Effects 5.5. La troisième (Classic) convient à After Effects 5.0.

Ce plug-in permet de sauvegarder avec ou sans perte. Si on sauvegarde avec pertes, on peut paramétrer la compression de deux manières, en choisissant la taille du fichier souhaité ou en choisissant un coefficient de qualité de 1 à 100.

A noter que le format jp2 requiert un profil ICC, il ne faut donc pas oublier de cocher dans Photoshop la case de la fenêtre d'enregistrement qui permet de joindre le profil.

En faisant option-click sur le bandeau supérieur on accède à 2 options supplémentaires.

La première permet d'enregistrer l'image compressée sans l'en-tête du jp2 et sans profil ICC. Cette option paraît inutile.

La deuxième permet de déterminer le nombre des niveaux de qualité (il s'agit d'une notion analogue à celle des niveaux dans le JPEG progressif). Ce paramétrage n'a pas d'impact sensible sur le poids des fichiers. On gardera la valeur proposée par défaut (12) en l'état actuel de nos connaissances.

Ce plug-in utilise la bibliothèque kakadu de David Taubmann, l'un des rédacteurs de

la norme JPEG 2000 (<http://www.kakadusoftware.com/>)

- **Le plug-in JPEG 2000 fourni avec Camera Raw d'Adobe** présente plus d'options.

Il permet bien entendu de choisir entre enregistrement avec ou sans pertes. On peut choisir ou non d'inclure les métadonnées, les informations de couleurs, la transparence et de rendre ou non le fichier compatible jp2 car ce plug-in utilise un format qui lui est propre le jpf.

Un bouton permet d'accéder à des fonctions avancées : type de coefficients utilisé pour la transformation en ondelettes, inclusion des métadonnées de type JPEG 2000 XML, XMP et EXIF, type des informations de couleurs embarquées et taille des tiles utilisé pour décomposer l'image. Ces différentes options sont intéressantes mais d'utilité relative actuellement, disons qu'elles préparent l'avenir.

On peut également définir dans quel ordre les informations sur l'images seront transmises pour décodage (par niveaux de qualité, par progression de la taille de l'image ou par transmission progressive des informations de couleur).

Dans le cas où on compresse avec perte il est possible de demander l'utilisation d'une région d'intérêt en sélectionnant une couche qu'on aura pris soin de créer au préalable dans Photoshop (Attention le plug-in ne se charge pas de cette tâche) et en donnant un pourcentage d'amélioration pour la région ainsi définie.

Une zone de prévisualisation permet de choisir un débit de transmission et de lancer une prévisualisation. Cette possibilité nous a semblé intéressante.

Test 1. Enregistrement en JPEG 2000 sans perte.

Nous utilisons une première image photographique de 10 Mo en RVB. Elle a été traitée normalement (niveaux + netteté).

Les tailles de fichier obtenus figurent dans le tableau suivant (on indique la taille en octets des fichiers, leur taille en Mo et le pourcentage de cette taille par rapport à la taille du fichier Photoshop :

PSD	TIFF LZW	TIFF ZIP	PNG	jp2
10 609 617	7 076 277	6 343 873	5 659 929	4 893 189
10,1 Mo	6,7 Mo	6 Mo	5,4 Mo	4,6 Mo
100 %	66,7 %	59,8 %	53,3 %	46,1 %

Nous utilisons une deuxième image photographique en niveaux de gris de 12 Mo.

Les tailles de fichier obtenus figurent dans le tableau suivant (on indique la taille en octets des fichiers, leur taille en Mo et le pourcentage de cette taille par rapport à la taille du fichier Photoshop :

PSD	TIFF LZW	TIFF ZIP	PNG	jp2
12 599 232	7 805 917	7 154 621	6 764 053	5 038 368
12 Mo	7,4 Mo	6,8 Mo	6,4 Mo	4,8 Mo
100 %	62 %	56,8 %	53,6 %	40 %

Dans les deux cas étudiés (et dans tous nos autres essais) le JPEG 2000 apparaît comme une excellente méthode pour enregistrer les images sans perte. Il permet d'obtenir des résultats meilleurs que le traditionnel TIFF dans ses deux variantes et même que le PNG

plus récent bien que peu employé. Cette utilisation, bien qu'un peu inattendue des professionnels, me paraît devoir retenir notre attention.

Test 2. Enregistrement en JPEG 2000 avec pertes.

Nous utilisons la première image utilisée ci-dessus et la compressons en JPEG avec ImageReady avec un facteur de qualité de 80 (enregistrement pour le print). Nous obtenons un fichier de 1 137 633 octets (1 Mo) soit 10,7 % du poids du fichier Photoshop.

Nous utilisons le plug-in JPEG 2000 de CameraRow pour obtenir un fichier de taille voisine en JPEG 2000 (taille du fichier 1 094 192 octets).

La comparaison des deux images obtenues dans Photoshop est difficile, elles sont toutes les deux de bonne qualité comme on pouvait s'y attendre. Elles paraissent identiques quand on les observe à 100 %. A un fort grossissement (400 %) l'image JPEG 2000 semble légèrement plus floue.

Une approche quantitative est tentée. Les images compressées sont superposées à l'image originale sur un calque mis en mode différence, l'image obtenue est aplatie et son histogramme est étudié. Il permet d'étudier pour la luminosité et couche par couche la distribution des valeurs absolues des différences entre les pixels des images. Nous connaissons les critiques que l'on peut faire de cette méthode mais c'est la seule qui peut-être tentée dans le cadre de cette première approche.

Dans le cas de l'image JPEG, pour la luminosité la moyenne est de 1,44 et l'écart type est de 0,90. Les résultats pour les 3 couches sont les suivants :

Couche rouge : moyenne 1,88, écart type 1,76

Couche verte : moyenne 1,10 écart type 0,97

Couche bleue : moyenne 2,07 écart type 1,78

Ces résultats excellents corroborent l'impression visuelle. L'examen de la répartition spatiale des écarts à l'image originale n'est pas homogène sur la surface de l'image comme la théorie permettait de le prévoir mais son hétérogénéité est relative (toute l'image est concernée).

Dans le cas de l'image JPEG 2000, pour la luminosité la moyenne est de 1,69 et l'écart type de 1,23. Les résultats pour les 3 couches sont les suivants :

Couche rouge : 2,05 écart type 2,03

Couche verte : 1,47 écart type 1,31

Couche bleue : moyenne 1,91 écart type 1,73

Ces résultats sont en accord avec l'impression visuelle obtenue mais ils sont assez dérangeants puisqu'ils donnent un léger avantage au JPEG sur le JPEG 2000.

Ils doivent être nuancés par plusieurs considérations :

- la méthode utilisée est loin d'être parfaite
- Il est peu probable que le logiciel utilisé mette en oeuvre un codeur optimal.
- Nous ne nous intéressons ici qu'au résultat à l'écran. Un protocole de comparaison sérieux intégrerait le processus de tramage.

Le même travail a été effectué avec la même image mais rééchantillonnée à 200 pixels de largeur. On est ici dans le cas d'une image utilisée sur Internet.

L'image originale fait 244 ko, en JPEG qualité 30, on obtient avec ImageReady un fichier de 6 573 octets tout à fait compatible en poids et en qualité avec Internet.

Nous avons rencontré des difficultés inattendues pour obtenir un fichier jp2 de même taille alors que la théorie nous enseignait que cela devait être très facile et qu'il était normalement possible d'obtenir des résultats beaucoup plus spectaculaires.

En effet en enregistrant comme pour le test 1 notre image de 244 ko avec nos plug-ins nous avons obtenu 56 600 octets. Après avoir modifié les options du plug-ins sans succès et pris un café, nous avons trouvé les responsables qui sont Photoshop 7 et Mac OS X. Par défaut Photoshop joint en effet aux données de l'image proprement dite l'icône, une vignette Macintosh et une vignette Windows.

Les résultats s'améliorent en décochant les 3 cases correspondantes dans le panneau Gestion des fichiers des préférences mais le résultat reste étonnant à 17 186 octets en utilisant la compression maximum. Nous notons que le même fichier placé sur un serveur LINUX subit une cure d'amaigrissement qui l'amène au poids record de 2 Ko. Le plug-in n'est pas en cause.

Nous avons testé l'utilisation d'ImageReady (en faisant exporter), le résultat est meilleur et on obtient un fichier d'une taille apparente de 3 325 octets en utilisant la compression maximum du JPEG 2000.

Pour obtenir un résultat sûr et rapidement vérifiable nous sommes passés sous Windows XP où nous avons fabriqué avec le logiciel Morgan un fichier de 6 423 octets de taille très proche de notre fichier JPEG. En tous cas ils occupent tous les deux 6 ko sur un serveur LINUX.

La comparaison visuelle des deux images à 100 % donne cette fois-ci un léger avantage au JPEG 2000. Les matrices 8 x 8 utilisées par la transformée de Fourier discrète créent un léger bruit qui n'existe pas sur l'image JPEG 2000. A 200 % (mais est-bien raisonnable?) l'image JPEG apparaît détériorée par les matrices qui deviennent légèrement visibles. L'image JPEG 2000 est meilleure mais légèrement plus floue que l'original

En résumé, les images JPEG 2000 présentent une meilleure qualité à l'oeil et leur utilisation sur Internet paraît souhaitable dès que les navigateurs les accepteront. Elles devraient permettre une diminution modérée mais réelle du poids des fichiers images.

En utilisant la compression JPEG 2000 au maximum on obtient un fichier de 2 Ko (moins de 1,5 %). L'image n'est pas utilisable mais elle est reconnaissable et à ce niveau, JPEG a déclaré forfait depuis longtemps.

Test 3. Enregistrement des images en 32 bits.

Photoshop est un des rares logiciels qui permet de traiter des images en 32 bits. Peu de formats supportent cette caractéristique. On ne peut enregistrer les images en 32 bits qu'en PSD en Brut, ou en TIFF. Le format jp2 est maintenant disponible. Nous avons vérifié que les plug-ins permettaient de compresser des images 32 bits. Rappelons que JPEG n'offre pas cette possibilité.

Test 4. Enregistrement d'une image avec transparence.

Nous avons pu enregistrer sans problème une image Photoshop comportant de la transparence. C'est une possibilité très intéressante dont ne disposait pas JPEG.

Pour aller plus loin

Livres

Taubman, D. and Marcellin, M.

JPEG2000 : Image compression fundamentals, standards and practice

Boston. November 2001

Kluwer Academic Publishers, 795 pages.

Le seul livre à notre connaissance disponible sur le JPEG 2000. Pour les passionnés, par l'un de ceux qui ont construit la norme.

MALLAT Stéphane

Une exploration des signaux en ondelettes

Les éditions de l'École Polytechniques

Paris. 2000

ISBN : 2-7302-0733-X

Un livre remarquable mais un livre de mathématiques réservé aux ingénieurs ou aux étudiants à partir de Bac + 4. Un exposé aux frontières de la recherche de l'état actuel de la théorie des ondelettes.

BURKE HUBBARD Barbara.

Ondes et ondelettes.

La saga d'un outil mathématique.

Pour la science.

Paris 1995

ISBN : 2-9029-1890-9

Un véritable outil de vulgarisation scientifique avec plusieurs niveaux de lecture. Ouvrage remarquable qui ne néglige pas les aspects humains et rend passionnant la saga en cause.

Sites

Nous publierons prochainement sur notre site une liste de liens. Le meilleur point d'entrée est bien entendu le site officiel du groupe JPEG : <http://www.jpeg.org/>

Conclusion

Le JPEG 2000 constitue une étape importante dans les procédés de codage de l'image numérique en général. Cette norme va probablement s'imposer et remplacer notre vieux JPEG qui nous aura rendu service pendant plus de 10 ans.

Cette évolution sera plus lente qu'on pouvait le penser pour plusieurs raisons. Elle nécessite la modification de nombreux logiciels et de nombreux dispositifs matériels. La mise en oeuvre de JPEG 2000 n'est pas aisée car il utilise des algorithmes nouveaux et des connaissances récentes que les ingénieurs n'ont pas appris pendant leur formation.

Le format jp2 qui est pour notre profession la manifestation pratique de la norme est un format très prometteur pour le stockage d'images sans perte.

Pour l'enregistrement avec pertes, les tests effectués ne permettent pas de confirmer les espoirs, sans doute excessifs, qu'avaient suscités les annonces et les publicités. On constate néanmoins une amélioration par rapport au JPEG. Cette amélioration devrait être plus nette avec l'apparition de codeur optimaux. Elle semble d'autant plus intéressante que la compression est forte.

Tout en apportant des gains réels en matière de compression, il nous semble que le JPEG 2000 sera surtout intéressant par les nouvelles fonctionnalités qu'il permettra de mettre en oeuvre. Tout dépend dans ce domaine du travail d'implémentation qui va être réalisé par les éditeurs de logiciels.