

L'automatisation dans l'agriculture et dans l'industrie agro-alimentaire.

Un exemple: le tri des fruits en fonction de leurs caractéristiques externes

Leemans V., Destain M.-F.
 Faculté universitaire des Sciences agronomiques
 2 Passage des Déportés
 5030 Gembloux
 Tel 081 62 21 64
 Fax 081 62 21 67

1. Introduction

Dans l'industrie agro-alimentaire, l'automatisation intervient de plus en plus pour mettre en oeuvre un contrôle de qualité des produits en ligne. La vision artificielle est souvent employée car elle présente des avantages importants liés au fait qu'il s'agit d'une méthode non-destructive, capable d'interprétations précises et autorisant des cadences élevées. Ses inconvénients résultent des coûts liés au développement relativement long des algorithmes de calcul et d'un certain manque de flexibilité: les algorithmes, appropriés à une tâche bien déterminée, ont une polyvalence relativement restreinte. On distingue deux types d'applications, en fonction du niveau de complexité. Dans le premier cas, un certain nombre de réalisations industrielles existent. Il s'agit essentiellement d'applications impliquant une mesure de dimensions, une évaluation de la couleur, une détection des défauts sur des produits dont la couleur de fond est relativement uniforme. Au deuxième niveau, on trouve des problèmes plus difficiles à résoudre, en raison de la très grande variabilité présentée par les produits agricoles. La quantification de la forme de produits ou la détection de défauts sur des produits dont la couleur de fond n'est pas uniforme restent des problèmes complexes, qui font l'objet de nombreuses recherches à l'heure actuelle.

Le tri des fruits appartient à cette deuxième catégorie. Le tri doit se faire selon des normes très précises, édictées par l'Union européenne ou l'OCDE. Par exemple, la "Norme de qualité pour pommes et poires" publiée par le Journal officiel de l'Union européenne (11.4.89) indique que les pommes de catégorie "Extra" doivent présenter la coloration typique de la variété. Elles doivent être exemptes de défauts, à l'exception de très légères altérations de l'épiderme. Elles doivent avoir la forme et le développement caractéristique de la variété. En catégorie I et II, les fruits peuvent présenter de légers défauts de coloration mais la pulpe doit en tous les cas être indemne. Sont admis dans ces deux catégories des défauts d'épiderme de forme allongée, respectivement inférieurs à 2 cm et 4 cm de longueur. Pour les autres défauts, la surface totale ne doit pas excéder respectivement 1 cm² et 2,5 cm². Cependant, les taches de tavelure ne peuvent pas

présenter une surface totale supérieure respectivement à 1/4 et 1 cm². En catégorie I peuvent être admis une légère déformation ou défaut de développement. En catégorie II, des défauts de forme et de développement sont tolérés, à condition que les fruits gardent leurs caractéristiques générales.

Dans cet article, nous présentons un aperçu des recherches menées à la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux en vue de trier automatiquement des pommes 'Golden Delicious' et 'Jonagold' sur base de la forme et des défauts. Le matériel utilisé est un dispositif de vision artificielle conventionnel, comportant une caméra couleur 3-CCD. Un tunnel d'éclairage illumine de manière diffuse les fruits qui se trouvent sur une bande transporteuse (Leemans et al., 1997).

2. Tri sur base de la forme

Deux orientations privilégiées sont choisies: 1. Les fruits sont présentés avec l'axe mouche-pédoncule parallèle à l'axe optique de la caméra; dans ce cas, on prend des images du pôle pédonculaire du fruit; 2. les fruits sont présentés avec l'axe mouche-pédoncule perpendiculaire simultanément à l'axe optique de la caméra et à la direction d'avancement des bandes transporteuses; on peut alors prendre des vues des joues des fruits. Un fruit est caractérisé par 7 images (Figure 1), dont six correspondent aux joues (obtenues en tournant le fruit d'angles de 60° autour de son axe pédoncule-mouche) et une est relative au pédoncule. Deux méthodes sont utilisées: l'une est basée sur le calcul de coefficients de forme, l'autre consiste à calculer la transformée de Fourier du contour de la pomme.

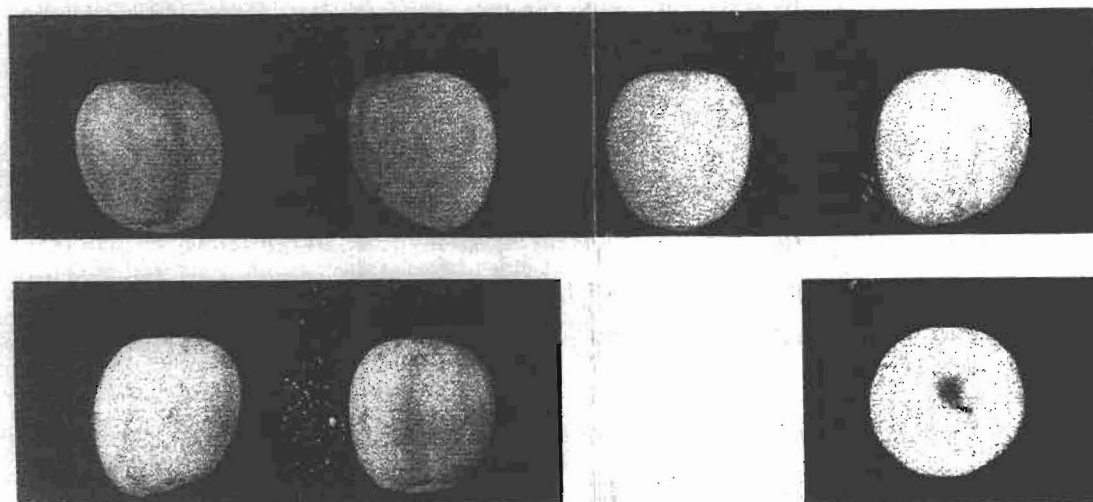


Fig. 1. Acquisition des images pour quantifier la forme.

2.1. Pré-traitement des images

L'information fournie par les trois capteurs RGB (rouge, vert et bleu) de la caméra est surabondante pour étudier la forme d'un fruit et seul le canal R (aisément discernable par rapport au support du fruit, choisi de couleur foncée) est extrait pour analyser les images. Les images sont seuillées à un niveau égal à 30, ce qui permet d'éliminer l'arrière-plan. Pour les vues des joues, une succession d'érosion, dilatation et érosion sont appliquées de façon à enlever le pédoncule de l'image, sans toutefois altérer la forme générale du fruit. Dans le cas de la méthode basée sur la transformée de Fourier, le contour du fruit est détecté et son centre de gravité recherché.

2.2. Tri sur base de coefficients de forme

La forme de pommes appartenant aux catégories I, II et au rebut est caractérisée par des coefficients de forme couramment utilisés en analyse d'images (Van der Heijden, 1994): la circularité c , la rectangularité r , l'excentricité ε , les moments centraux d'ordre trois η_{30} et η_{03} (calculés par rapport à l'axe de la bande transporteuse et par rapport à l'axe horizontal qui lui est perpendiculaire), les moments invariants ϕ_1 et ϕ_2 .

A partir d'un test t de Student, il apparaît que certains coefficients de forme sont significativement différents en fonction de la catégorie à laquelle appartient la pomme. Par exemple, les vues des joues des pommes de catégories I et II ont une forme assez proche d'un cercle ($c_{\text{moyen}}=1,17$; $\varepsilon_{\text{moyen}}=1,05$), tout en présentant une certaine conicité vers la mouche. Les pommes de rebut sont soit plus allongées ($c_{\text{moyen}}=1,22$; $\varepsilon_{\text{moyen}}=1,07$), soit présentent une conicité moins marquée ou bien encore sont disymétriques par rapport à l'axe pédoncule-mouche.

Pour trier les fruits, on commence par rechercher s'il existe une corrélation entre les coefficients de forme de façon à trouver les combinaisons optimales. D'une manière générale, la corrélation entre les paramètres relatifs aux joues et au pédoncule est très faible: il y a donc intérêt à associer des coefficients appartenant aux deux vues. On réalise alors une analyse discriminante, en considérant des combinaisons comportant successivement 2, 3 ou 4 coefficients de forme. La précision de la classification approche 90 % si l'on veut discerner les catégories I et II du rebut. La Figure 2 montre, à titre d'exemple, les résultats obtenus avec une analyse discriminante linéaire en prenant les coefficients $(\eta_{30\text{max}})_{\text{joues}}$ et $(\varepsilon)_{\text{pédoncule}}$. La précision dans le classement n'est pas

vraiment améliorée si l'on prend trois ou quatre coefficients. Elle n'est pas non plus fortement modifiée selon que la fonction discriminante est linéaire ou quadratique. Par contre, elle décroît de façon appréciable si on réalise les calculs uniquement sur base des vues des joues ou si moins de six vues de joues sont prises en considération. Par ailleurs, la méthode est handicapée par le fait qu'elle nécessite le calcul des moments d'ordre trois, qui sont liés à l'orientation de la pomme. Pour s'affranchir de l'orientation du fruit, on peut remplacer les moments d'ordre trois par les moments invariants. Malheureusement, dans ce cas, le pourcentage de fruits bien classés diminue de manière appréciable et n'atteint plus que 78 %.

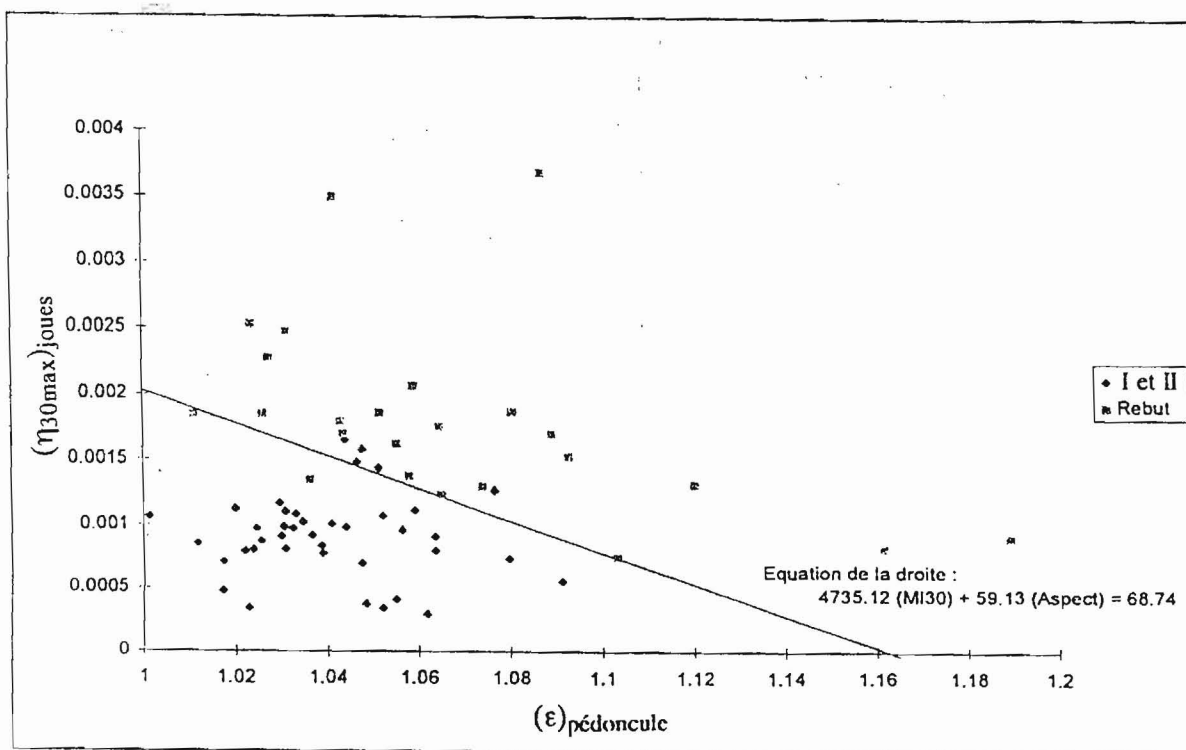


Fig. 2. Tri des pommes en 2 catégories (I + II; rebut) à partir des coefficients de forme.
Analyse discriminante linéaire à deux variables: $(\eta_{30\max})_{\text{joues}}$ et $(\epsilon)_{\text{pcdoncule}}$.

2.3. Tri sur base d'une analyse de Fourier

Le contour du fruit est paramétré en traçant un rayon vecteur $r(k)$ à partir du centre de gravité de l'image et en le faisant tourner d'angles égaux, de façon à obtenir N points sur le contour (Jähne, 1995). On calcule alors la transformée discrète de Fourier de $r(k)$ qui s'écrit:

$$R(h) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r(k) \exp\left(\frac{-j2\pi hk}{N}\right)$$

où les $R(h)$ sont les coefficients de Fourier avec $h = 0, 1, 3 \dots N-1$. Utilisant la notation d'Euler, on peut transformer l'exponentielle complexe en fonctions trigonométriques et écrire:

$$R(h) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[r(k) \cos\left(\frac{2\pi hk}{N}\right) - j r(k) \sin\left(\frac{2\pi hk}{N}\right) \right]$$

Cette expression montre clairement que l'on peut séparer les coefficients en une partie réelle $\text{Re}(h)$ et une partie imaginaire $\text{Im}(h)$, à partir desquelles on définit l'amplitude $F(h)$:

$$F(h) = \sqrt{\text{Re}(h)^2 + \text{Im}(h)^2}$$

et le déphasage $\varphi(h)$:

$$\varphi(h) = \frac{\text{Im}(h)}{\text{Re}(h)}$$

L'amplitude des harmoniques $F(h)$ est normalisée et rendue adimensionnelle en divisant chacune d'elles par $F(0)$ qui représente le rayon moyen de la pomme. Un exemple de résultat obtenu est donné à la Figure 3.

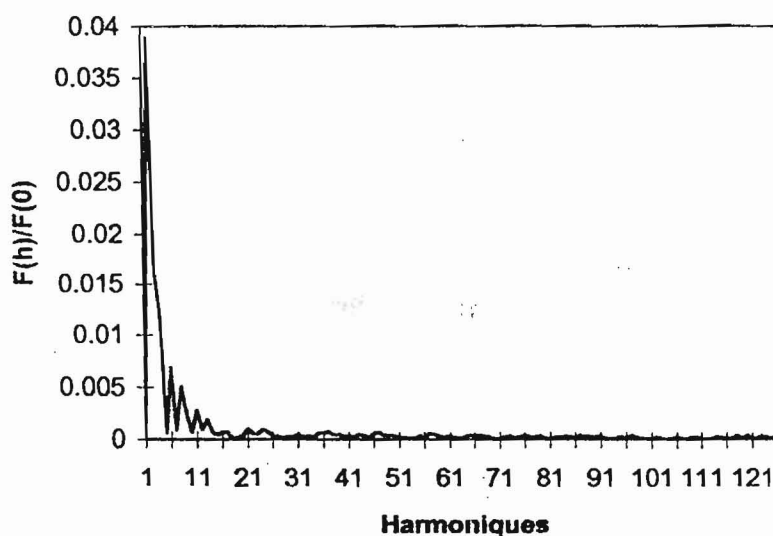


Fig. 3. Transformée de Fourier du contour: rayon vecteur $r(k)$.

Les pommes **a** et **b** représentées à la Figure 4 appartiennent à la catégorie I. Les spectres d'amplitudes normalisées font apparaître des pics correspondant respectivement à $F(3)$, $F(4)$ et $F(2)$, $F(4)$. La forme des deux fruits représentés est telle qu'ils s'inscrivent bien dans un "carré", néanmoins la pomme **a** est plus "triangulaire" que la pomme **b**, qui est plutôt allongée. Ceci explique donc les valeurs élevées de $F(4)$ pour les deux fruits, de $F(3)$ pour la pomme **a**, de $F(2)$ pour la pomme **b**. Les pommes **c** et **d** ont été mises au rebut par les inspecteurs, en raison de leur forme non typique. Les calculs indiquent que la pomme **c** présente une amplitude $F(2)$ trop élevée (allongement excessif) et une amplitude $F(3)$ trop faible (manque de conicité). La pomme **d** se caractérise par une valeur $F(4)$ trop faible, ce qui traduit qu'elle s'inscrit mal dans une forme quadrangulaire. Ceci montre que les amplitudes $F(h)$ ont une signification physique précise qui peut être utilisée pour quantifier la forme des fruits.

Pour reproduire le classement manuel des opérateurs de la criée, on réalise une analyse discriminante en sélectionnant comme variables les amplitudes d'harmoniques particulières. Pour les 6 vues des joues, on calcule la valeur maximale de $F(2)$, la valeur minimale de $F(3)$ et $F(4)$. Pour la vue du pédoncule, on prend en compte $F(1)$, $F(3)$, $F(9)$. En effet, pour qu'une pomme 'Golden Delicious' soit admise en catégorie I, il faut, pour les joues, que $F(2)$ ne soit pas trop élevé (pour que le fruit ne soit pas trop allongé), que $F(3)$ ne soit pas trop faible (sinon la pomme n'est pas suffisamment conique), que $F(4)$ soit relativement élevé (pour exprimer que la pomme s'inscrit dans un carré); pour la vue pédonculaire, il faut que $F(1)$ soit faible (sinon la vue est trop éloignée d'un cercle), etc... En recourant à une analyse discriminante quadratique, la précision de la classification atteint 96 %. Ce résultat apparaît satisfaisant si l'on sait que les pommes mal classées appartiennent à la catégorie intermédiaire II, qui est moins différenciée que la catégorie I et le rebut. L'inspection visuelle réalisée par les opérateurs, considérée ici comme référence, n'est pas absolue et peut être considérée comme moins objective qu'une mesure automatique.

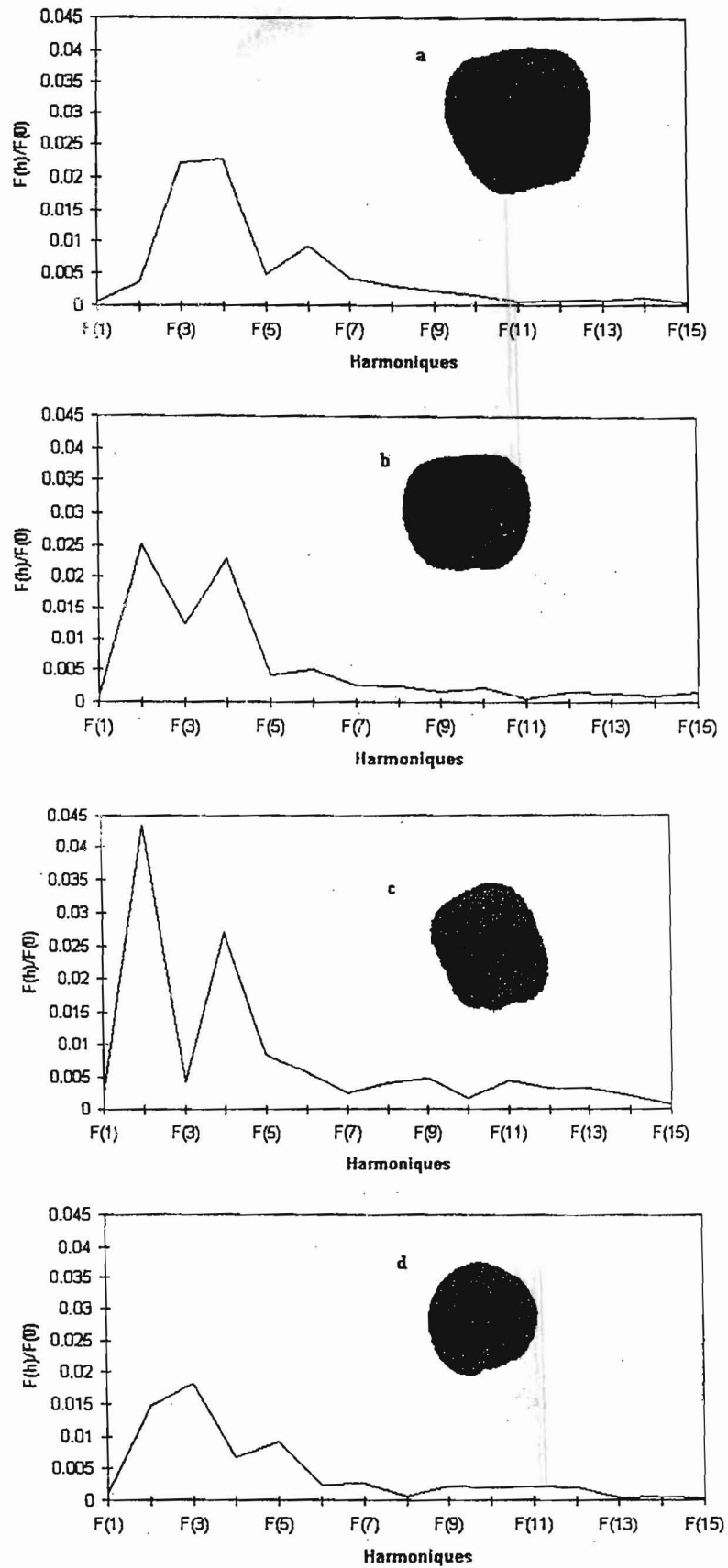


Fig. 4. Forme des pommes et harmoniques.

2.4. Comparaison coefficients de forme - analyse de Fourier

L'analyse harmonique présente un certain nombre d'avantages pour la quantification de la forme des fruits, puisqu'elle fournit une description du contour qui peut être amenée invariante en translation, rotation et échelle. En effet, l'origine des coordonnées est fixée au centre de gravité de chaque fruit et, par conséquent, les coefficients sont rendus indépendants de la position en translation du fruit. Si le fruit tourne d'un angle γ , l'amplitude des coefficients $F(h)$ reste inchangée, seul varie le déphasage. Cette propriété est particulièrement intéressante dans le cas qui nous occupe. Si le fruit présente un défaut d'orientation par rapport à la position qui lui est assignée (par exemple, l'axe pédoncule-mouche n'est pas rigoureusement perpendiculaire à la direction d'avancement), il n'en résulte aucune erreur dans le calcul des $F(h)$. Pour rendre les coefficients de forme indépendants de la taille des fruits, on divise les amplitudes $F(h)$ par $F(0)$. Ces considérations montrent la supériorité de l'analyse harmonique sur les coefficients de forme.

3. Etude des défauts des pommes

Comme nous l'avons signalé précédemment, l'image est acquise par la caméra à l'aide de trois capteurs R, G, B ayant chacun leur propre sensibilité spectrale. N'importe quelle couleur peut être reconstituée à partir d'une combinaison linéaire de ces trois primaires R, G et B. D'autres espaces couleur que le système RGB sont largement utilisés. Citons notamment le système IUV qui peut être obtenu à partir du système RGB par combinaison linéaire et le système HSI qui est issu du précédent par une transformation en coordonnées cylindriques. Lorsqu'on désire classer les fruits sur base de leur couleur, il apparaît que ces trois espaces couleur donnent lieu au même niveau de précision, pourvu que l'on prenne en considération simultanément trois paramètres, qu'il s'agisse de R, G, B ou I, U, V ou encore H, S, I. Lorsqu'il s'agit de détecter les défauts sur un fruit, il est également indispensable de disposer des informations provenant des 3 canaux colorimétriques. Dans cette étude, nous avons adopté le système RGB, directement issu des mesures.

3.1. Pré-traitement

Les images sont acquises avec la résolution maximale autorisée par la caméra et le frame grabber, à savoir 720 x 540 pixels. Cette résolution est ensuite réduite par 3 linéairement,

ce qui donne 240 x 180 pixels: on a donc 3,6 pixels par mm². Les lenticelles sont enlevées de l'image au moyen d'un filtre remplaçant l'élément central d'un carré de 5 x 5 pixels par la valeur médiane. Les bords de l'image sont érodés pour supprimer la zone plus sombre à la périphérie du fruit, liée à la courbure de celui-ci.

3.2. Etude de la variabilité de fruits sains

Dans un premier temps, on étudie la variabilité de la couleur de fruits ne présentant aucun défaut. Pour ce faire, on considère 4 lots de 20 pommes saines appartenant à la classe I, elle-même divisée en sous-classes A++, A+, A et Ar (caractérisées par des couleurs allant du vert au jaune) à la criée. L'axe mouche-pédoncule est perpendiculaire à l'axe optique de la caméra. On acquiert 4 images des joues de chaque fruit, en faisant tourner celui-ci de 90°.

La couleur d'un fruit correspond à une distribution normale à 3 dimensions et est caractérisée par le vecteur moyenne \mathbf{m} et la matrice de variances et covariances Σ . La couleur moyenne d'un fruit s'exprime par le vecteur:

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} \bar{r} \\ \bar{g} \\ \bar{b} \end{bmatrix}$$

avec \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} les valeurs moyennes R, G, B des pixels des 4 images d'un fruit.

La matrice de variances et covariances ou matrice de dispersion s'écrit:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{RR} & \sigma_{RG} & \sigma_{RB} \\ \sigma_{RG} & \sigma_{GG} & \sigma_{GB} \\ \sigma_{RB} & \sigma_{GB} & \sigma_{BB} \end{bmatrix}$$

avec σ_{RR} , σ_{GG} , σ_{BB} les variances des pixels respectivement selon les bandes spectrales R, G, B et σ_{RG} , σ_{RB} , σ_{GB} les covariances.

L'analyse statistique montre que le vecteur \mathbf{m} varie de fruit à fruit. Par contre, la matrice des variances et covariances Σ est sensiblement constante, quel que soit le fruit considéré et quelle que soit la classe à laquelle il appartient. Ceci signifie donc que pour tous les fruits les surfaces d'égale densité de probabilité sont des ellipsoïdes de même forme centrés aux points moyens.

3.3. Segmentation des défauts

On cherche à segmenter les défauts sur des fruits présentant de la tavelure, de la roussissure, des piqûres d'insectes, des blessures non cicatrisées, etc. Cette segmentation peut se faire en plusieurs étapes. La première, dont nous donnons le principe ici, est la plus importante. Elle consiste à évaluer les différences existant entre la couleur d'un pixel d'une image et la couleur globale de l'image. On calcule la distance généralisée de Mahalanobis (Dagnelie, 1986) selon l'expression:

$$\Delta = \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{M})^t \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{M})}$$

avec:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}; r, g, b \text{ étant les valeurs mesurées pour le pixel considéré;}$$

Σ^{-1} est la matrice inverse de la matrice de variance et covariances qui, comme nous l'avons vu plus haut, est constante pour la population considérée;

$(\mathbf{x} - \mathbf{M})^t$ est la matrice transposée de $(\mathbf{x} - \mathbf{M})$; \mathbf{M} est un vecteur donnant une estimation de la couleur globale du fruit. Il est constitué des valeurs médianes de la couleur selon les bandes spectrales R, G, B. La médiane a été préférée plutôt que la moyenne car elle est moins sensible au bruit et plus rapide à calculer.

Si la distance de Mahalanobis est élevée, l'écart entre la couleur du pixel considéré et la couleur globale du fruit est grand: le pixel est un défaut. Inversement si Δ est faible, le pixel considéré appartient à du tissu sain. Une valeur seuil de Δ permettant de considérer un pixel soit comme un défaut, soit comme du tissu sain, a été déterminée en analysant 32 pommes présentant des défauts divers. Un exemple de résultat obtenu avec une valeur seuil égale à 9 est donné à la Fig. 5. Quatre fruits présentant des défauts très divers sont illustrés: tache de roussissure autour d'un creux dans la pomme (a); défaut peu contrasté par rapport à la couleur de fond (b); taches de roussissure diffuses dans tout le fruit (c); coup (d). Globalement, la détection des défauts est bonne. Toutefois, des zones localisées à la périphérie du fruit peuvent apparaître comme des défauts. Ceci n'entache pas la valeur de la méthode car, en processus industriel, la zone perçue par la caméra serait limitée à la partie centrale du fruit (les parties latérales étant perçues via des dispositifs optiques supplémentaires). Par ailleurs, la segmentation peut être affinée par des procédés plus élaborés, qui augmentent la précision au prix d'un temps de calcul plus élevé.

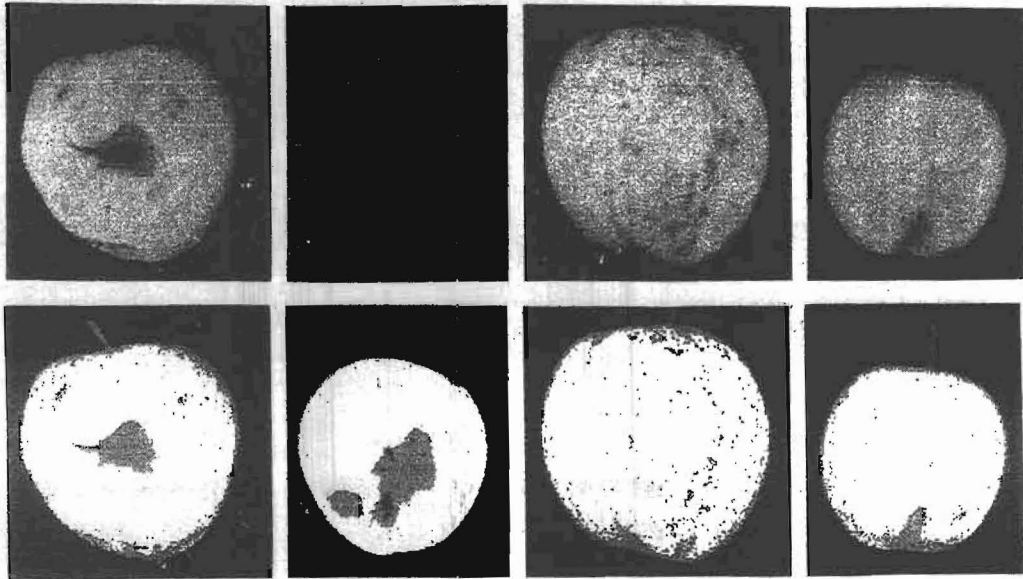


Fig. 5. Segmentation des défauts.

4. Conclusion

La quantification de la forme des fruits et la détection de taches d'origines diverses est nécessaire pour satisfaire aux normes de l'Union Européenne. La vision artificielle est une technique prometteuse pour trier les fruits en ligne selon ces normes. Les développements actuels devraient conduire à la conception de machines de tri bien adaptées aux nécessités industrielles au cours des prochaines années.

5. Références

Leemans V., Magein H., Destain M.-F. Apple shape inspection with computer vision. Proc. from the International Conference « Sensors for Nondestructive Testing - Measuring the quality of fresh fruits and vegetables », Orlando, 1997, 316-327.

Dagnelie P. Analyse statistique à plusieurs variables. Les presses agronomiques de Gembloux, 1986, 362 pp.

Van der Heijden F. Image based measurement systems. John Wiley & Sons, 1994, 338 pp.

Jähne B. Digital image processing. Springer-Verlag, 1995, 383 pp.