

TECHNOLOGIE

DURÉE : 2 HEURES.

CONSIGNES

*Aucun document n'est autorisé.
Calculatrices autorisées.*

SUJET

Le toner, ou encre en poudre, est l'encre utilisée dans les appareils d'impression photo-électrique, procédé appelé « Xérographie », comme les imprimantes laser et les photocopieurs. C'est une poudre, constituée en majeure partie de fines particules de matière plastique, de résine et de pigment.

Le processus traditionnel de fabrication du toner (de cette poudre, donc) consiste à pulvériser le produit de base, puis à tamiser le résultat pour obtenir la granulométrie voulue. Bien qu'il ait été amélioré pour optimiser le rendement, ce processus mécanique consomme beaucoup d'énergie. De plus, il produit des particules de formes irrégulières.

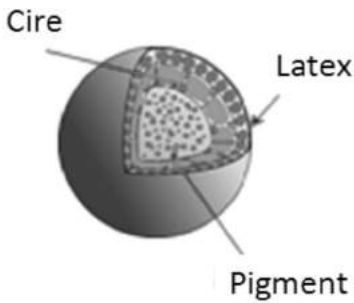
Les chercheurs du centre de recherche de la société X. au Canada, ont développé une approche chimique pour fabriquer de manière économique des particules de toner plus petites. Ils ont perfectionné une méthode de croissance contrôlée des particules à partir des molécules, pour obtenir la taille, la forme et la structure voulues. Le processus n'est pas mécanique et donc bien plus économique et respectueux de l'environnement. Les particules de toner sont produites à faible énergie, et leur croissance contrôlée en milieu aqueux. Elles sont ensuite extraites et traitées (lavées, séchées).



Toner
Conventionnel

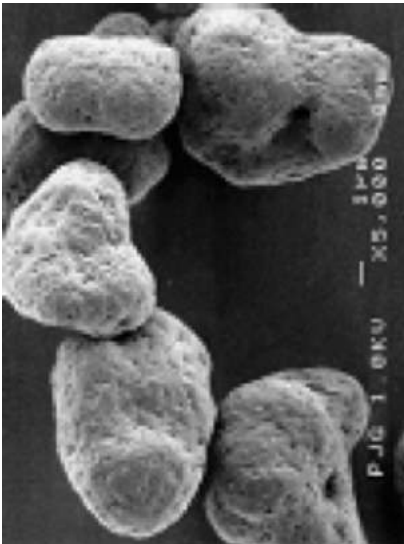


Toner EA

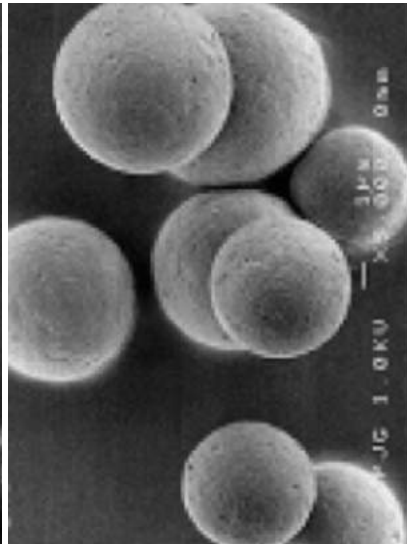


Les particules obtenues sont plus petites et de forme plus régulière, ce qui favorise la qualité d'impression tout en permettant de réduire la consommation de toner. Ils ont ainsi pu fabriquer des particules sphériques ou quasiment sphériques de 3 à 5 microns de diamètre, tellement fines qu'il en faut une centaine pour dessiner le point à la fin de cette phrase. Les impressions sont plus précises et plus économiques, car elles utilisent moins de toner. Par rapport au diamètre habituel de 9 microns, des particules de 5 microns permettent d'économiser 40 % de

toner. Les impressions couleur rendent plus précisément les subtilités, les dégradés ou les changements de teinte, ainsi que les motifs complexes.



Toner fabriqué par pulvérisation mécanique.



Toner fabriqué par procédé chimique d'agrégation par émulsion.

I. Questions relatives à la conception du produit technique

Question I.1. Représentez graphiquement le procédé traditionnel et le nouveau procédé de fabrication du toner. (2 points)

Question I.2. Résumez les avantages de la nouvelle technologie, selon trois axes : la qualité de l'image imprimée, l'économie d'encre, les gains environnementaux à la fabrication de l'encre. (2 points)

II. Questions relatives à la réalisation industrielle

La société X. souhaite mesurer la taille des particules (**granulométrie**). Pour cela, elle dispose traditionnellement de plusieurs méthodes de mesure, principalement :

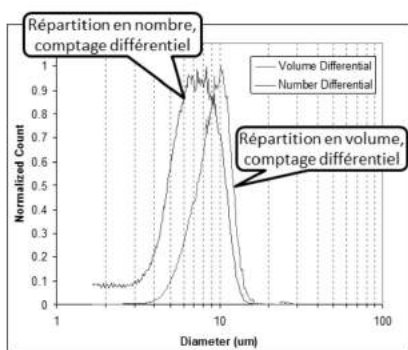
1. Tamisage à sec : supérieur à 100 microns
2. Tamisage humide : supérieur à 30 microns
3. Sédimentométrie : 1 micron à 100 microns
4. Centrifugation : 0,1 micron à 20 microns
5. Diffraction laser : 0,02 micron à 2 mm
6. Microscopie : 50 microns à 1 mm

Question II.1. (1 point) Que préconisez-vous à la société X. d'utiliser, et pourquoi ?

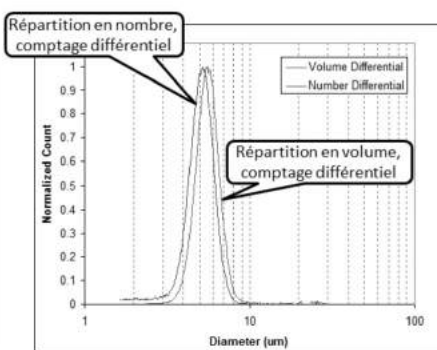
Certaines techniques de **granulométrie** déterminent la taille de particules prises individuellement. D'autres méthodes d'analyse granulométrique différentiel et classent les particules en s'appuyant sur différentes propriétés liées à leur taille. Ainsi le type de taille mesuré dépend du principe physique de la méthode d'analyse employée, selon que l'on détermine la surface en fonction de la taille, la masse ou le volume en fonction de la taille, ou bien l'intensité de la lumière diffractée ou diffusée en fonction de la taille.

On obtient donc plusieurs distributions des tailles de particules : répartition en nombre, en volume, en surface, en masse etc. Il faut toujours savoir par quoi la distribution est pondérée, car les répartitions granulométriques obtenues à l'aide de différentes techniques ne sont pas directement comparables.

Le mode de représentation, le plus classique et le plus fréquent des distributions granulométriques est le diagramme semi-log. Les tailles sont représentées sur l'axe des abscisses en échelle logarithmique de base 10 (en général en micron) et les ordonnées en échelle arithmétique de 0 à 100 %.



Toner fabriqué par pulvérisation mécanique.



Toner fabriqué par procédé chimique d'agrégation par émulsion.

Observez les graphes ci-dessus.

« Différentiel » se comprend par opposition à « cumulé ».

Question II.2. (1 point) Dessinez la forme qu'aurait l'une de ces courbes en cumulé. On remarque sur ces deux graphes que le diamètre moyen en nombre est inférieur au diamètre moyen en volume. Comme nous l'avons vu plus haut, dans une granulométrie en nombre chaque particule a la même importance, alors que dans une granulométrie en mesure, les particules ont une influence proportionnelle à cette mesure (masse, taille, surface, etc.).

Question II.3. (1 point) Pourquoi le diamètre moyen en nombre est-il inférieur au diamètre moyen en volume ?

Par ailleurs, on remarque dans l'intitulé des abscisses que la taille des particules est assimilée à un diamètre. Or il y a de multiples possibilités d'associer un diamètre à une particule. On distingue ainsi trois groupes de diamètres dits « diamètres équivalents » :

- diamètres de sphère équivalente ;
- diamètres de cercle équivalent ;
- diamètres statistiques (diamètre de Feret, diamètre de Martin).

Diamètres de sphère équivalente

Le résultat de la mesure est exprimé par le diamètre qu'aurait la sphère théorique se comportant de la même manière que la particule considérée. Une telle sphère est appelée sphère équivalente. Si la technique utilisée permet de mesurer un volume, on parle de sphère équivalent-volume, caractérisée par un diamètre équivalent-volume. Si on mesure une surface projetée, on peut définir de la même manière un diamètre équivalent-surface. Le diamètre équivalent de sédimentation (ou diamètre de Stokes) sera le diamètre de la sphère qui possède la même vitesse de sédimentation que la particule, etc. Les dimensions équivalentes sont donc en réalité des dimensions fictives, relatives à la technique utilisée, mais qu'il est commode d'employer.

	Nom	Propriété équivalente de la sphère	Expression
d_v	Diamètre en volume	Volume	$V = \frac{\pi}{6} d_v^3$
d_s	Diamètre en surface	Surface	$S = \pi d_s^2$
d_{sv}	Diamètre en surface spécifique	Surface/volume	$d_{sv} = \frac{d_s^3}{d_v^2}$

Question II.4. (1,5 point) Calculez les différents diamètres de sphères équivalentes (en volume, en surface, en surface/volume) pour un cube d'arête $l = 1$ (sans unité).

En fait, la **granulomorphie** est un fort sujet d'intérêt pour la société X.

Question II.5. (0,5 point) Quel est le sujet d'étude de la granulomorphie par rapport à celui de la granulométrie ?

Question II.6. (0,5 point) Justifiez pourquoi la forme des particules de toner est aussi importante que leur taille.

Pour cela, la société X. acquiert un analyseur d'images de la taille et de la forme des particules. Cet analyseur est basé sur le principe suivant : un échantillon est prélevé à partir d'une suspension diluée de particules. Cette suspension circule à travers une cellule de mesure dans laquelle les images des particules sont captées par éclairage stroboscopique et une caméra CCD. Les particules circulent dans le plan de focalisation de la caméra grâce à un système de contrainte hydrodynamique : l'échantillon est introduit dans la cellule de mesure par une buse, et le flux de particules est canalisé et aplati par un flux de liquide de canalisation. Ainsi,

toutes les particules sont analysées dans la zone focale de netteté et sont orientées pour présenter à la caméra leur plus grande dimension.

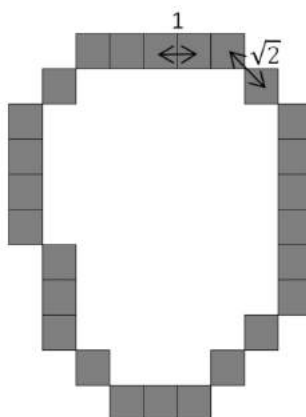
Question II.7. (2 points) Dessinez un schéma de la cellule de mesure, comprenant le système de canalisation et le système de capture d'images.

Question II.8. (0,5 point) Quel est l'avantage d'une telle technique d'analyse par rapport à la microscopie ?

Un système de seuillage permet d'obtenir des pixels sombres (projection d'une particule) et des pixels clairs (faisant partie du fond). Le traitement numérique de ces images pixellisées permet d'extraire les contours des particules, et par conséquent, un certain nombre de paramètres morphologiques.

La **taille** peut être caractérisée en utilisant le diamètre (ou le périmètre) du cercle équivalent – qui est défini comme le cercle ayant la même surface projetée que l'image de la particule.

Pixellisation et calcul de périmètre



Question II.9. (2 points) A partir du tableau de pixels ci-dessous, représentant le contour d'une particule, décrivez deux procédés pour estimer le périmètre de la particule en fonction du nombre de pixels :

a) en donnant à tous les pixels comptés un poids égal ;

b) en comptant une distance de 1 entre deux pixels côte-à-côte, et de $\sqrt{2}$ entre deux pixels de coin.

La **forme** peut être caractérisée en utilisant la **circularité** – un paramètre comparant le périmètre de l'image projetée de la particule avec la circonférence de la surface du cercle équivalent.

La **circularité** est définie par la circonférence du cercle équivalent divisée par le périmètre de la particule, soit

$$\text{Circularité} = \frac{\text{circonférence du cercle équivalent}}{\text{périmètre de la particule}} = \frac{2\sqrt{\pi A_p}}{P_p}$$

A_p : aire de la particule

P_p : périmètre de la particule

Question II.10. (3 points) Calculez la circularité des trois formes géométriques suivantes :

- Carré
- Rectangle dont le rapport d'aspect (rapport hauteur sur largeur) est de 5
- Rectangle dont le rapport d'aspect (rapport hauteur sur largeur) est de 10



Une **circularité** d'environ 0,95 constitue un optimum pour les particules de toner.

Question II.11. (1 point) Expliquez les désavantages d'une circularité inférieure, respectivement supérieure, à cette valeur typique, pour les particules de toner.

Avec l'analyseur précédent, la société X. peut caractériser un échantillon en moins de 3 minutes pour des centaines de milliers de particules et avec une préparation minimale de l'échantillon. Cependant la société X. se demande si elle va investir dans un **granulomètre laser**, qui lui permettrait une analyse en ligne permettant le contrôle direct et en temps réel du procédé de fabrication.

La théorie sous-jacente aux granulomètres laser est basée sur les éléments fondamentaux développés dans les théories de diffraction de Fraunhofer et de diffusion de Mie et Rayleigh, (selon la taille des particules par rapport à la longueur d'onde incidente).

Les appareils permettent une utilisation directe au sein des conduites du procédé (in-line), d'autres demandent une **dérivation** (on-line), souvent effectuée par aspiration à l'aide d'un venturi et refoulement dans la conduite.

L'appareil considéré à l'achat par la société X. mesure en **dérivation** et après dilution la taille des particules en suspension en voie liquide. La mesure de distribution granulométrique est basée sur des millions de particules, 4 fois chaque seconde. Le principe physique fondamental ne nécessite pas de calibration.

Question II.12. (1 point) Sur quels critères la société X. devrait-elle prendre la décision d'acquiescer ce nouveau type de granulomètre ?

III. Questions relatives à la gestion du processus industriel

Six Sigma est une méthode de gestion du processus industriel née aux États-Unis dans les années 1980. Le principe vise à travailler sur le processus afin que seuls des produits conformes aux exigences soient livrés. La méthode est pensée pour faire en sorte que tous les éléments issus du processus étudié, soient compris dans un intervalle s'éloignant au maximum de 6 écarts-type (ou 6 sigma, soit 3,4 défauts par million) par rapport à la moyenne générale des éléments issus de ce processus.

Question III.1. (0,5 point) Dans les faits, pensez-vous que l'intervalle de tolérance des valeurs mesurées par rapport au cahier des charges doit toujours être de 6 écarts-type (6 sigma). Pourquoi ?

Le lean management est une méthode d'amélioration systématique des processus, provenant des usines japonaises. Lean Six Sigma (LSS) est une approche intégrée d'amélioration des processus combinant Lean et Six Sigma. La société X. est une entreprise leader dans le déploiement de LSS. Elle décide d'appliquer la méthode au processus industriel de production de toner.

Une étude d'impact économique est réalisée avant de prendre la décision de procéder à chaque projet d'amélioration.

Un des projets d'amélioration vise à réduire les déchets de latex de 5 % à 1 %. Pour évaluer la viabilité de ce projet (et établir son niveau de priorité parmi d'autres projets), on calcule la différence entre la valeur actuelle des flux futurs (sur les 5 ans à venir) du projet et la valeur actuelle des investissements nécessaires à celui-ci. Pour actualiser les flux de trésorerie, on applique à chaque flux de trésorerie FT_t une formule d'actualisation telle que :

$$\text{Valeur actuelle nette} = FT_t * \text{facteur d'actualisation} = \frac{FT_t}{(1+i)^t}$$

t = temps à venir jusqu'au flux de trésorerie considéré

i = taux d'actualisation

$$\frac{1}{(1+i)^t} = \text{facteur d'actualisation}$$

Bien que le taux d'actualisation utilisé soit souvent le taux de rentabilité minimum exigé par l'entreprise ou le coût des capitaux utilisés par l'entreprise, en principe le taux d'actualisation d'un projet doit refléter son risque. Ainsi, pour le cas présent, la société X., société multinationale cotée et réputée sûre, choisit néanmoins un taux d'actualisation de 15 % concernant ce projet, compte tenu de son niveau de risque.

Le prix des matériaux de la polymérisation en émulsion est estimé à 50 centimes d'euro par kg, quelle que soit la couleur (noir, cyan, magenta, jaune). Les frais généraux sur les matériaux (achat, transport, stockage) sont évalués à 10 %. Par ailleurs on a les prédictions suivantes :

Année	Volume (tonnes)	Frais généraux de production (€/kg)
Année 0	1 000	2
Année 1	2 000	1,9
Année 2	3 500	1,6
Année 3	6 500	1,2
Année 4	12 000	0,8

Le coût du projet est essentiellement du coût de main d'œuvre : 600 heures de travail d'ingénieur, pour un coût chargé annuel de 150 000 €, en comptant annuellement 44 semaines de 35 heures.

Question III.2. (4 points) Calculez la valeur actualisée nette du projet sur les 5 ans à venir. Pour arriver au résultat final, vous effectuerez les calculs suivants (en faisant bien attention aux unités, que vous explicitez) pour les années 0, 1, 2, 3, 4 :

- Coût total de production si 0 % des lots sont en dehors des spécifications (optimum théorique)
- Coût total de production si 5 % des lots sont en dehors des spécifications (en l'absence de projet LSS)
- Coût total de production si 1 % des lots sont en dehors des spécifications (grâce au projet LSS)

Puis, vous appliquerez les facteurs d'actualisation appropriés.
Enfin, vous effectuerez un calcul coût/bénéfice pour le projet.

Question III.3. (1 point) Déduisez-en la décision à prendre par la société X. concernant la réalisation de ce projet.