

FABRICATION PAR ENLÈVEMENT DE MATIÈRE

La découpe jet d'eau

JÉRÔME SAURET [1]

La découpe jet d'eau est encore peu déployée dans les établissements scolaires, mais sa maturité récente et sa polyvalence devraient changer la donne.

Historique et technologies

La découpe au jet d'eau (DJE) regroupe sous un même vocable deux technologies différentes.

La découpe à l'eau pure (DEP), la première à avoir vu le jour dans les années 1960, utilise l'effet tranchant d'un jet d'eau propulsé à très haute pression (300 MPa, soit 3 000 bar, voire plus) au travers d'un orifice très fin (typiquement 0,05 à 0,30 mm de diamètre) pour trancher, comme le ferait un cutter, les matériaux souples ou tendres (caoutchouc, moquette, plastiques divers, balsa, etc.) [1].

Cette première application a rapidement trouvé ses limites (épaisseurs limitées, inefficace sur certains matériaux trop durs). Dans les années 1980, la

mots-clés

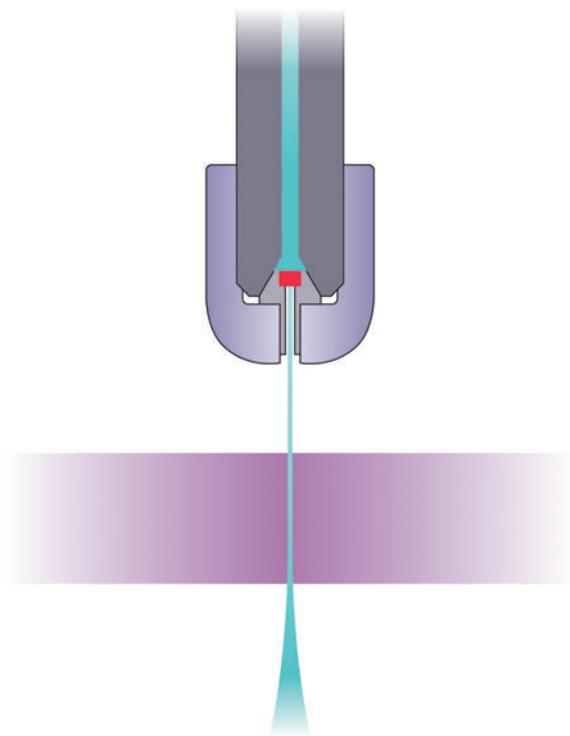
machine, matériaux, procédé

technique à l'eau chargée ou découpe jet d'eau abrasive (DJEA) a été imaginée pour dépasser les limites de la DEP. Cette technique permet au jet, grâce à l'adjonction d'abrasif, de couper des matériaux impossibles à travailler avec la DEP [2].

Depuis les années 1990, la technique abrasive a connu des évolutions majeures et on peut considérer qu'elle est mature depuis 2008-2010. Déjà largement diffusée dans l'industrie, elle connaît un des développements les plus forts dans le secteur de la machine-outil.

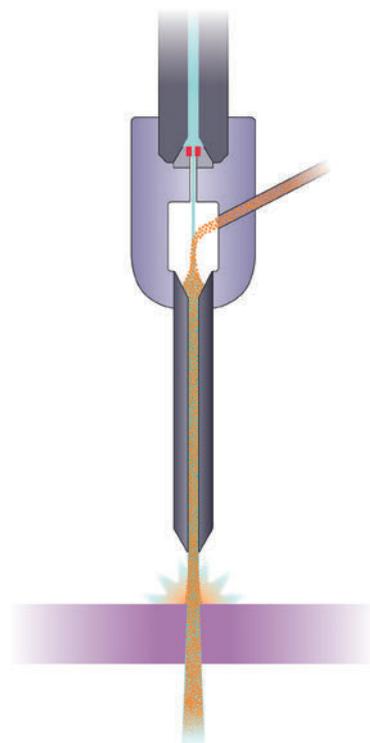
À ce jour, elle est présente sur le marché au travers de deux canaux bien distincts : les boutiques à découpe (*jobshops*) et les installations en interne.

Les *jobshops* (entre 120 et 150 en France), aussi appelés « boutiques de découpe », sont des prestataires spécialisés qui proposent de découper sur demande toutes sortes de matériaux. Très techniques, ces centres maîtrisent le fonctionnement délicat des premières machines mises sur le marché et sont à même de réaliser des travaux divers sur un large spectre de matériaux (carrelage, acier, inox, titane, fibre de carbone, etc.).



1 La découpe à l'eau pure

[1] Directeur général chargé du développement chez DeuroS/PTV France, www.ptvfrance.com.



2 La découpe jet d'eau abrasive

La disponibilité de ces *jobshops* a contribué à la diffusion de la technologie et conquis de nombreux utilisateurs. Ceux-ci, grâce à leur expérience de la DJE en *jobshop*, intègrent par la suite la technique en interne, améliorant de fait la maîtrise des flux (transports des matières et délais de production) et les performances qualitatives et quantitatives des applications DJE.

Un autre facteur contribuant à l'augmentation des performances par l'internalisation de la DJE est la possibilité de s'équiper de machines spécifiques, alors que le *jobshop*, par essence, possède un équipement généraliste. Les capacités particulières de la machine peuvent permettre de piloter numériquement la pression, d'avoir une précision de coupe accrue ou d'intégrer des accessoires dédiés à des tâches particulières, comme la découpe de tubes avec un sixième axe asservi ou l'usinage cinq axes.

Les constructeurs proposent désormais des machines aux capacités accrues, les composants et consommables sont plus fiables (canons, tête de coupe) et les machines sont plus simples à mettre en œuvre (plus besoin de tour de main ou de nombreux essais). En interne, la DJEA devient un vrai atout, car elle est au plus près de la production et en capacité de réaliser des travaux variés avec un outil unique : un jet d'eau et de l'abrasif.

En parallèle de cette évolution, on a également pu voir apparaître des applications spécifiques à certains domaines (l'aéronautique, le médical). Ces applications mettent en œuvre des processus particuliers



3 La découpe d'un bloc de calcin

bénéficiant de la caractéristique principale de cette technologie : découper tous les matériaux sans modification moléculaire ni échauffement, même dans les matériaux très sensibles aux variations de température comme le calcin 3.

De par sa versatilité, la DJEA a conquis une place de premier plan dans les équipements qui rendent les entreprises performantes.

Ce développement est visible dans tous les domaines de l'activité manufacturière, dans le bâtiment, l'aéronautique, le spatial comme la métallerie ou la décoration 4. En effet, les caractéristiques propres de la DJE font qu'elle s'adapte très bien aux productions en petite série et en prototypage, ce que les entreprises (surtout celles qui produisent localement) recherchent actuellement.

Description d'une découpe jet d'eau

Une installation de jet d'eau (DEP/DJEA) est constituée de trois éléments :

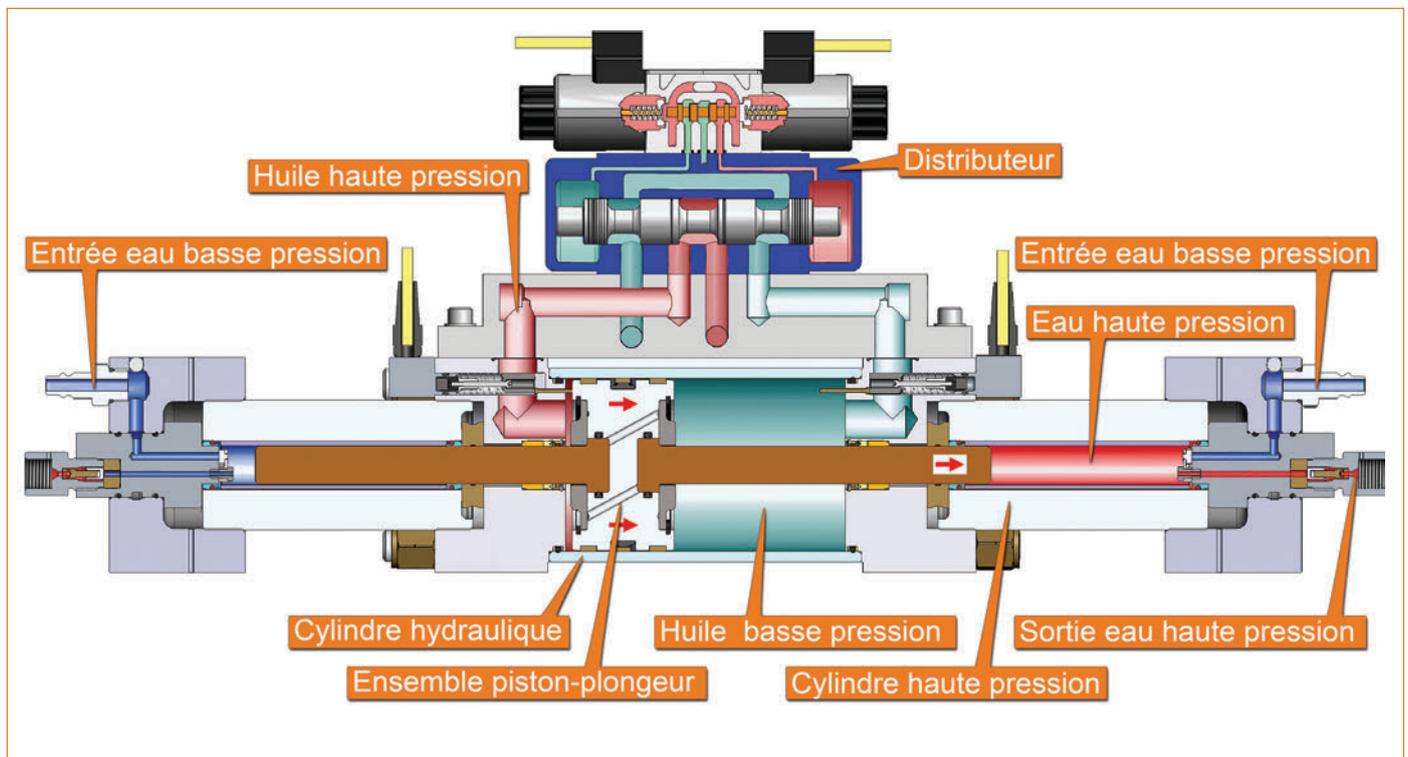
- une ou des pompes ;
- une table de coupe ;
- un système de commande des axes.

La pompe a pour tâche de porter des débits de 1 à 5 litres d'eau par minute de la pression du réseau (6/8 bar, soit 0,6/0,8 MPa) jusqu'à 4000 bar (soit 400 MPa), voire plus. Pour ce faire, deux techniques sont disponibles :

- la pompe à action directe ou pompe triplex (trois cylindres) qui est actionnée par un ensemble moteur/courroie par l'intermédiaire d'un vilebrequin. À ce



4 Marqueteries de marbre utilisant la DJE



5 L'intensifieur

jour, cette technologie n'est utilisée en découpe que par un seul constructeur (plus un second qui propose un seul modèle) :

– l'intensifieur ou système à démultiplicateur de pression **5**.

Dans une pompe à intensifieur, un circuit primaire de type hydraulique produit un flux d'huile sous pression (typiquement 220 bar, soit 22 MPa) qui est utilisé pour actionner alternativement deux pistons en opposition.

Ces pistons dits « basse pression » poussent chacun un piston dit « haute pression » (généralement en céramique) qui comprime alternativement l'eau grâce à un système classique de clapets d'admission/échappement, et ce dans le rapport de leurs surfaces respectives (les surfaces piston huile/piston eau sont dans un rapport de 20), ce qui pousse l'eau à 4 000 bar, soit 400 MPa (\llcorner huile à 200 bar \times rapport de surface de 20 = eau à 4 000 bar).

Le mouvement des pistons hydrauliques est asservi par un système de pilotage qui enclenche le mouvement alternatif dès lors qu'il y a ouverture du circuit THP (très haute pression) lors d'un appel d'eau sous pression et le coupe quand le circuit d'eau est coupé.

Les arrêts/démarrages et le fait qu'en fin de course (changement de direction) il y a un point où la pression exercée sur l'eau est nulle produisent des irrégularités de pression nuisibles à la qualité de coupe. Pour absorber ces variations, on intercale entre l'intensifieur et la tête de coupe un dispositif absorbeur (atténuateur) faisant office de réserve tampon de contenance adaptée à la puissance de la pompe

(0,7 à 2 litres). Ce dispositif est passif, mais joue un rôle important dans la qualité de l'ensemble. On observera que la régularité de la pression dépend aussi de la qualité de pilotage/régulation du mouvement des pistons. À cet égard, les pompes disposant d'inverseurs de mouvement commandés électroniquement présentent un avantage certain en permettant d'utiliser des atténuateurs de moindre capacité et moins coûteux.

Globalement les intensifieurs sont plus coûteux à l'achat, mais proposent des performances et des temps de travail sans interruption supérieurs aux dispositifs à action directe. En effet, il est difficile pour une pompe à action directe de maintenir une pression de travail continue supérieure à 4 000 bar (soit 400 MPa). Les maintenances interviennent ainsi à 400 heures sur une pompe à action directe alors que le délai dépasse les 800 heures sur un intensifieur.

La table de coupe est plus classique : la technologie de guidage pignon-crémaillère de précision prévaut (précision corrigée par laser \pm 0,04 mm). Elle a supplanté les systèmes vis à billes qui présentent des performances similaires, mais ont des vitesses de déplacement trop basses, entre autres pour les transferts, ce qui occasionne des pertes de temps. Par ailleurs, les systèmes vis à billes se prêtent mal à des dispositifs de grandes longueurs (vis à billes trop longues et donc extrêmement coûteuses).

Les moteurs linéaires qui associent précision, souplesse et réactivité (accélération et vitesse) sont encore émergents sur le marché, mais seront sûrement le futur

des tables jet d'eau, surtout en matière d'eau pure où les vitesses de coupe sont plus élevées.

En matière de commande numérique, l'utilisation de commandes « classiques » issues du monde de la machine-outil a longtemps prévalu (Numm, Fanuc, Siemens). À ce jour, les seules sociétés à avoir recours à ce type de commande numérique sont les assembleurs (sociétés qui achètent « sur étagère » pompe et table et se limitent à assembler le tout en assurant un minimum d'intégration).

Tous les acteurs importants du marché du jet d'eau qui conduisent une réelle politique de développement ont été amenés à utiliser des programmes spécifiques disponibles sur le marché (comme IGEMSTM) ou bien à développer, comme certains d'entre eux, une commande spécifique adaptée à la problématique du jet d'eau.

En effet, la nature même du jet chargé, qui constitue l'outil, est liquide et n'a donc pas une action homogène sur toute la hauteur de coupe. Naturellement, un phénomène de retard de coupe apparaît et induit la nécessité de ralentir et accélérer l'outil en fonction non seulement du matériau, mais également de la géométrie de coupe.

La modulation dynamique de la vitesse est contrôlée par un algorithme propre à la technologie. Celui-ci doit être adapté à la fois à la matière (nature et épaisseur), à la pression et à la charge d'abrasif. La spécificité et la difficulté résident dans la non-homogénéité des facteurs et la non-linéarité des relations entre ceux-ci.

À cette problématique s'ajoute celle de la dépouille. En effet, la technologie jet d'eau chargée implique l'apparition d'un V inversé dans la matière et qui est dû à la perte d'énergie du jet au fur et à mesure qu'il s'éloigne de la surface de la matière à couper.

Si cette dépouille a longtemps été traitée en diminuant la vitesse, solution plutôt hasardeuse (la vitesse d'obtention d'une dépouille nulle étant très difficile à piloter), il existe maintenant des têtes dites « oscillantes » qui compensent automatiquement ce phénomène.

Ces dispositifs, qui ont pour but d'améliorer les vitesses et les qualités de coupe, s'appuient sur des innovations matérielles, dont le développement est séquentiel et qui nécessite l'achat de nouveaux équipements, mais également sur des améliorations logicielles qui connaissent un développement plus continu et des possibilités de mise à jour plus directes sur les machines déjà existantes. Ainsi, il est indispensable de pouvoir accéder, sans limite dans le temps, aux mises à jour du logiciel de commande numérique pour être assuré de disposer en permanence des algorithmes les plus aboutis.

La DJE utilise de l'eau comme outil, additionnée ou non d'abrasif. À ce jour, les pompes les plus abouties ne nécessitent ni eau osmosée ni refroidie comme cela fut un temps. Sur le marché, de nombreux intervenants encouragent à traiter l'eau par osmose inverse (déméralisation intégrale + filtration totale), ce qui est coûteux en matériel, en eau et en consommation d'énergie.

Si cela a pu, un temps, être nécessaire pour éviter l'usure prématurée des joints, les installations actuelles peuvent s'affranchir de tels dispositifs superfétatoires tout en ménageant deux points : utiliser une eau faiblement minéralisée (éventuellement obtenue avec un « simple » adoucisseur) et présentant une température inférieure à 25 °C, tout en obtenant des durées de vie de l'ordre de 800 à 1 000 heures.

Dans le cas de la DJEA, s'ajoute le recours à de l'abrasif. Pour plus de 99 % des cas, l'abrasif utilisé est le grenat (almandine, de la famille des silicates – silicate double d'aluminium et de magnésium), un minéral chimiquement neutre, ne présentant aucun danger (à ne pas confondre avec la silice), d'origine éolienne ou minière. À côté de son usage en joaillerie, il sert dans l'industrie de l'aiguillage, du polissage ou comme coussinet dans la mécanique de précision **6**.

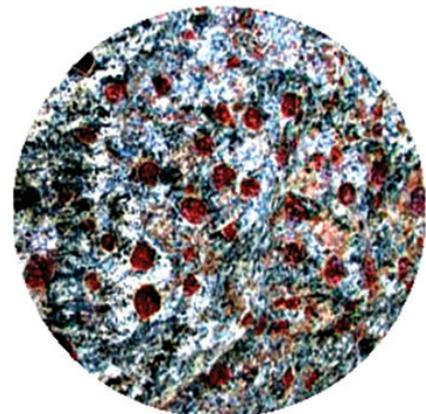
Dénoté comme le fruit du même nom, sans doute à cause de sa couleur la plus répandue, le rouge, il s'est formé à haute température dans des roches métamorphiques ou éruptives. Les gisements de grenat australiens et indiens sont alluvionnaires et sont les plus importants du monde. La forme des grains (arrondie) est le fruit de l'érosion éolienne puis de celle de l'eau. Ils ont d'abord été érodés sur des centaines de kilomètres, de l'intérieur des terres vers la côte, puis des siècles d'action des vagues ont ramené les grains à une taille idéale pour la plupart des applications abrasives.

D'une densité de 3,5 à 4,2, sa dureté peut varier de 6,5 à 7,5 sur l'échelle de Mohs (échelle de mesure de la dureté des minéraux).

Les grains sont simplement triés et criblés, aucun traitement mécanique ne vient casser les structures arrondies.

Le problème de l'emballage et de la protection contre l'humidité est fondamental et un grand soin est apporté à la protection des sacs tout au long du processus de purification et d'acheminement.

GMA est la marque de référence et le plus grand fournisseur mondial d'abrasifs à base de grenat australien. La marque est actuellement concurrencée par les grenats en provenance des Indes.



6 Nodules de grenat minier

Il existe aussi, surtout sur le marché des États-Unis, un grenat d'origine minière obtenu par broyage de nodules de grenats extraits par des procédés miniers : le Barton. Assez présent de l'autre côté de l'Atlantique, il est quasiment inutilisé en Europe (du fait de son coût intrinsèque et des coûts additionnels de transport). Il est pourtant plus efficace grâce à ses arêtes vives (issues du broyage).

Le Barton peut être une solution pour des travaux très particuliers, entre autres en microdécoupe, où les quantités utilisées sont très faibles et l'impact du prix de l'abrasif réduit.

Quid des établissements scolaires ?

La présence d'équipements de DJE dans les établissements scolaires est relativement récente et de ce fait peu commune. En conséquence, aucun développement significatif de l'environnement didactique de ces machines n'avait encore été réalisé, que ce soit au niveau de la conception des machines ou des outils mis à disposition pour l'exploitation pédagogique de cette technologie.

Pour le développement d'EduJet™ **7**, ERM a établi une étroite collaboration avec PTV, un constructeur de machines jet d'eau établi en République tchèque depuis 1991 et leader sur le marché des pays de l'Est (plus de 600 machines vendues à ce jour). Fort de son expérience, PTV a pu puiser dans une considérable bibliothèque de solutions matérielles et logicielles pour répondre aux besoins d'ERM et formuler



7 La machine EduJet™

une gamme unique de machines dédiées à l'enseignement et répondant aux impératifs spécifiques de cet environnement.

En premier lieu : la sécurité. EduJet™ est une machine complètement fermée qui garantit l'isolation de la zone de coupe avec quatre avantages majeurs :

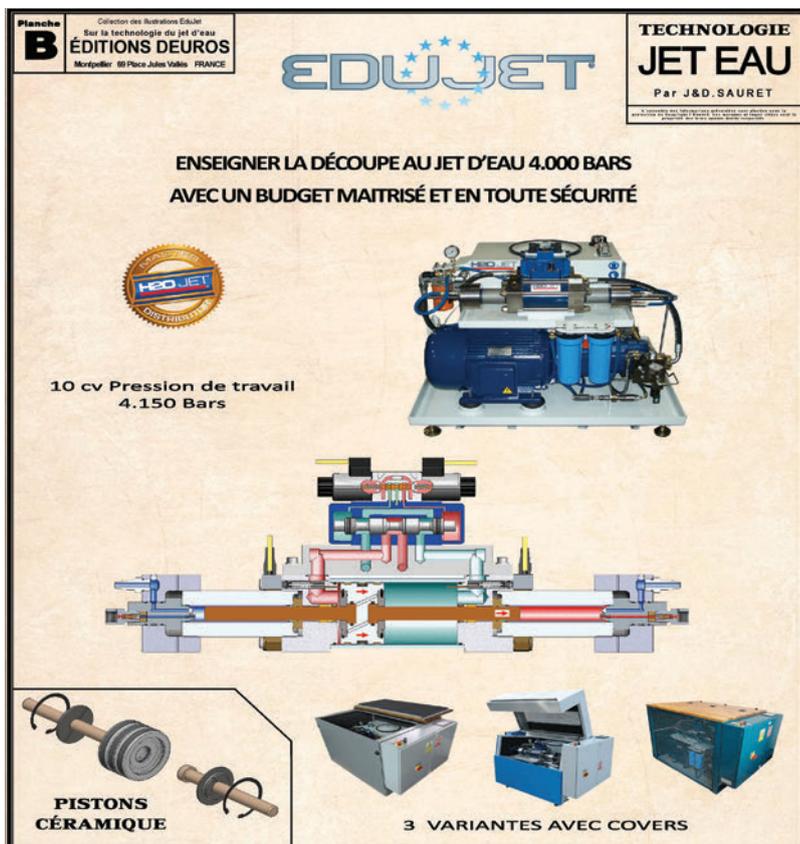
- l'assurance d'une sécurité totale (on se bouscule souvent autour d'une machine jet d'eau) ;
- la suppression des arrêts intempestifs dus aux interruptions de barrière laser que l'on peut observer sur les machines ouvertes ;
- l'utilisation d'une porte vitrée permet également une observation très proche de la coupe ;
- la quasi-annulation de la « pollution » des machines avoisinantes par les particules issues de la fragmentation de l'abrasif au contact de la matière. En effet, dans une machine ouverte, la poussière de grenat se propage à son environnement et s'amalgame aux lubrifiants présents sur les machines voisines constituant de fait une véritable « pâte émeri » susceptible de perturber leur fonctionnement.

En deuxième lieu : l'état de l'art. Les EduJet™ sont, de par leurs caractéristiques techniques intrinsèques (pression, précision, dispositifs divers), représentatives de ce qui se fait de mieux sur le plan de la technique à ce jour (abrasif variable, têtes diamants à alignement garanti, logiciel de préparation, etc.), et ce sans aucune concession.

Enfin, l'évolutivité. EduJet™ est une gamme de produits qui présente la caractéristique unique sur le marché mondial du jet d'eau de permettre un *upgrade* de la machine après livraison (accessoires, compléments, logiciels, etc.), et ce par simple utilisation de kits d'*upgrade* aisés à installer (éventuellement par l'établissement, les utilisateurs eux-mêmes), sans aucun surcoût (si ce n'est les frais de port) par rapport au coût supplémentaire requis pour une installation d'origine (prix des accessoires et options affichés, et garantis trois ans minimum).

D'un point de vue de l'enseignement proprement dit, ERM et PTV France ont développé un ensemble de documents techniques didactiques fournis avec la machine (illustrations du fonctionnement, maintenance, dépannage, etc.). Par exemple, le fonctionnement du jet d'eau est expliqué sur une version modernisée des panneaux muraux Vidal Lablache que l'on trouvait dans nos classes des années soixante **8**.

L'ensemble de ces éléments sont fournis sous forme papier et électronique (PDF et, dans la plupart des cas, Publisher) et sont accompagnés d'une véritable bibliothèque d'illustrations (plus de 300), que ce soit des images et des vidéos de coupe, des illustrations de composants avec plans et vues en coupe ou des photos de pièces. Tout ceci est mis à la disposition des enseignants (libre de droits) pour bâtir leurs cours.



8 Le fonctionnement du jet d'eau

L'utilisation de découpe jet d'eau dans les établissements

Le jet d'eau est un outil quasi universel, car il coupe toutes les matières. À ce titre, il est l'outil d'enseignement privilégié pour tout enseignant adressant des thématiques de découpe de matériaux et peut intéresser, à titre principal ou complémentaire, de nombreux départements d'un établissement.

Un établissement peut ainsi faire se succéder, sans aucune adaptation de l'outil, un professeur de maroquinerie réalisant des travaux sur du cuir (découpe de forme pour monter des chaussures ou des sacs à main), un professeur d'art réalisant une sculpture, des élèves de BTS réalisant la découpe de leur robot (structure titane) ou encore un TP de fabrication mécanique avec réalisation d'une ébauche de pièce en carbone.

À ce titre purement démonstratif, on peut également imaginer qu'un établissement équipé de jet d'eau, ayant pour vocation de servir ses sections fabrications mécaniques, mette la machine à disposition de la section pâtisserie pour la démonstration « non comestible » de l'intérêt de la découpe eau pure pour partager un gâteau.

Plus en détail, un enseignant en mécanique travaillant sur les tests de tractions peut conduire une séance avec un groupe d'élèves sur la réalisation d'éprouvettes

destinées à ces essais. En effet, le jet d'eau s'adapte très bien à la découpe de celles-ci, car elle se réalise sans production de chaleur et sans modification moléculaire du matériau travaillé.

En amont, le professeur pourra commencer, en salle informatique, par préparer le dessin de la pièce à découper. La découpe pourra ensuite s'effectuer sur une matière non formée ou sur une partie de pièce finie. Grâce à la licence de site du programme de dessin et de préparation (nombre de postes réseaux illimités), les étudiants pourront, individuellement ou par groupe, préparer, sur tout ordinateur relié au réseau, le programme de coupe.

Dans un second temps, ils pourront analyser les différentes caractéristiques de la coupe, comme la qualité ou la quantité d'abrasif, et leurs effets sur le temps de coupe de la pièce, sur le simulateur de commande numérique (nombre de postes réseaux illimités). Ils pourront également se familiariser sans risques au fonctionnement de la commande numérique, individuellement et sans se bousculer devant l'écran de la machine.

Une fois le programme préparé et validé, il pourra être transféré sur la machine, par le réseau ou par clé USB, pour y être mis en œuvre en disposant le matériau sur la surface de coupe, en assurant sa stabilité par un bridage léger et le démarrage du programme de coupe.

Une fois la coupe achevée, les éprouvettes – séchées et rincées avec les douchettes eau et air intégrées à la table de coupe – seront alors directement exploitables pour le TP de traction.

Une technologie suffisamment mature pour être enseignée

La maturité récente de la technique de DJE et sa capacité de traiter tous les matériaux avec un outil unique sont deux facteurs porteurs d'un fort développement à court terme.

Implantée dans un établissement scolaire, véritable « couteau suisse », une machine jet d'eau spécifiquement adaptée aux contingences du monde éducatif permet de disposer d'un outil de découpe universel unique et performant. L'investissement dans une machine jet d'eau, somme toute relativement bas par rapport à une découpe laser « métal », est vite rentabilisé, grâce à une mutualisation facilitée par la mise à disposition de licences de site, une grande simplicité de fonctionnement et une polyvalence unique.

Une technologie mature, des coûts d'acquisition et d'utilisation modérés et une polyvalence certaine sont autant de facteurs qui attirent de plus en plus d'entreprises, même petites, vers cette technologie. La capacité d'un centre de formation de former ou initier des élèves à l'utilisation ou aux principes de cette technologie démontrera son caractère de pionnier, constituant par là même une vitrine de modernité facilitant la collaboration avec le tissu industriel local. ■