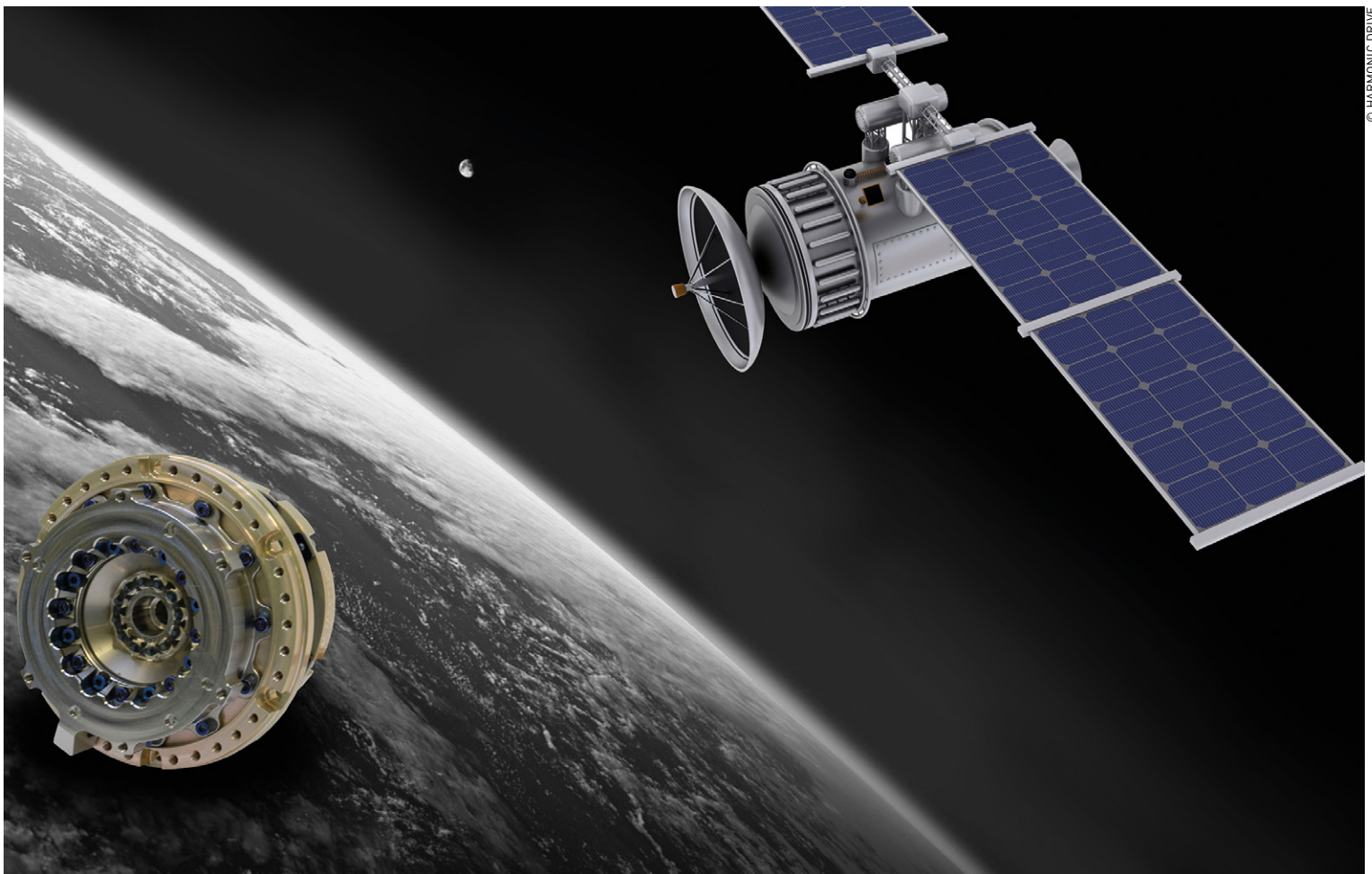


CONDITIONS EXTRÊMES

Quand les composants ont la vie dure!

À haute altitude, dans l'espace, sur l'océan ou dans ses profondeurs, en sous-sol, dans des atmosphères explosives, agressives chimiquement, à très hautes et très basses températures, certains composants ont la vie dure. **Quelles sont les solutions apportées par les fabricants pour les contextes les plus délicats?** Tour d'horizon de quelques-unes d'entre elles, pour chaque secteur.



© HARMONIC DRIVE

Les séries de réducteurs CPL et le réducteur Harmonic Drive ZirconLine, développé spécialement et lubrifié à sec, sont destinés au spatial.

Dans la transmission de puissance, qu'elle soit hydraulique, pneumatique ou électrique, les conditions de fonctionnement d'une machine sont parfois extrêmes : charges lourdes, accélérations ou décélérations très importantes ou vibrations. Mais dans le secteur industriel comme pour les applications mobiles, c'est tout simplement l'environnement extérieur qui peut se révéler extrême. Les composants doivent alors s'adapter à des situations qui rendent difficile leur fonc-

“ Même s'il ne représente qu'une part très faible, le spatial dépasse tous les autres environnements en matière de conditions extrêmes.

tionnement : travail en haute altitude, dans l'espace, sur l'océan ou dans ses profondeurs, en sous-sol, dans des atmosphères explosives, poussiéreuses, agressives chimiquement, à très hautes ou très basses températures.

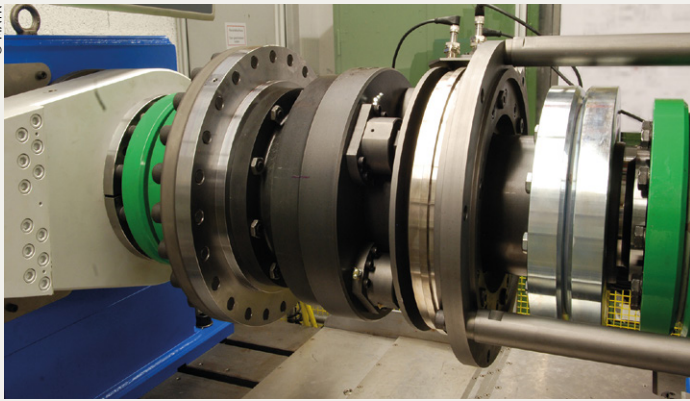
Le défi du spatial

Reste à savoir quels sont les secteurs réellement extrêmes? Où se situe le curseur? « Pour tout ce qui concerne les panneaux solaires, même ceux situés dans

Mayr : lutter contre les glaces

Dans le secteur pétrolier, les navires de forage travaillent souvent dans des profondeurs océaniques extrêmes, jusqu'à 10 000 mètres, là où des plateformes ne peuvent être installées. Pour ces opérations particulières, les unités de propulsion azimuthales mis en place par Mayr sont des systèmes d'entraînement adaptés, qui servent aussi à stabiliser le bateau face aux courants et à la houle.

Une autre problématique apparaît lors de forages en eaux



polaires. Des fragments de glace peuvent venir endommager l'hélice et surcharger le système de propulsion. Le limiteur de couple doit déconnecter le propulseur du système d'entraînement en cas de surcharge, et ainsi protéger la chaîne cinématique des variations de couples élevés et des destructions irréversibles. « Les unités à pods sont entraînées mécaniquement par une transmission qui assure le transfert de la vitesse à l'arbre d'entraînement du propulseur. Le limiteur de couple est situé en amont et protège efficacement le système d'entraînement » précise le groupe. « C'est un limiteur de couple de sécurité à débrayage automatique avec quatre éléments de sécurité. En l'absence de perturbations, le limiteur de couple transmet le couple réglé à 13 900 Nm, sans jeu, avec une grande précision et une grande répétabilité. Lorsque la force exercée dépasse la valeur réglée lors d'une surcharge, à cause de la glace dans le propulseur, le limiteur coupe la chaîne cinématique, laissant l'énergie cinétique accumulée se dissiper librement jusqu'à l'arrêt. Le limiteur de couple de sécurité reste en position déclenchée jusqu'au réenclenchement des éléments à l'aide d'un dispositif pneumatique. Le réarmement peut être effectué, jusqu'à 10 tours par minute. »

le désert, on n'est pas dans l'extrême », estime Laurent Noraz, directeur général de la filiale France d'Harmonic Drive, spécialiste des réducteurs elliptiques, planétaires et des servomoteurs. La vérité, à en croire les spécialistes, est que certains environnements sont plus extrêmes que d'autres. Même s'il ne représente qu'une part très faible de ce marché, le spatial dépasse tous les autres dans ce domaine. Harmonic Drive se pose comme un vrai spécialiste de cet environnement.

surtout pour des applications robotiques ou pour le Solar Array Drive Mechanisms, un système d'orientation des panneaux solaires des satellites. Les séries de réducteurs CPL et le réducteur Harmonic Drive ZirconLine, développé spécialement et lubrifié à sec, sont prédestinés pour cet usage.

Ainsi que le rappelle Laurent Noraz, tout est différent dans l'espace : « Il faut d'abord résoudre un problème de poids, et donc être le plus compact possible. Se posent aussi des questions de température avec de fortes

et rapides amplitudes thermiques. Mais la particularité principale, c'est l'ultra vide qui dégrade nombre de composants. Les plastiques peuvent par exemple dégazer et donc se dégrader et polluer les autres composants. Pour leurs propriétés de résistance aux fissures, les aciers inox sont privilégiés parmi les aciers. De plus, la lubrification nécessaire aux éléments mécaniques en mouvement est complexe (graisses spécifiques à l'ultra vide ou traitements lubrifiants de surfaces). » Eichenberger, le spécialiste suisse du file-

“

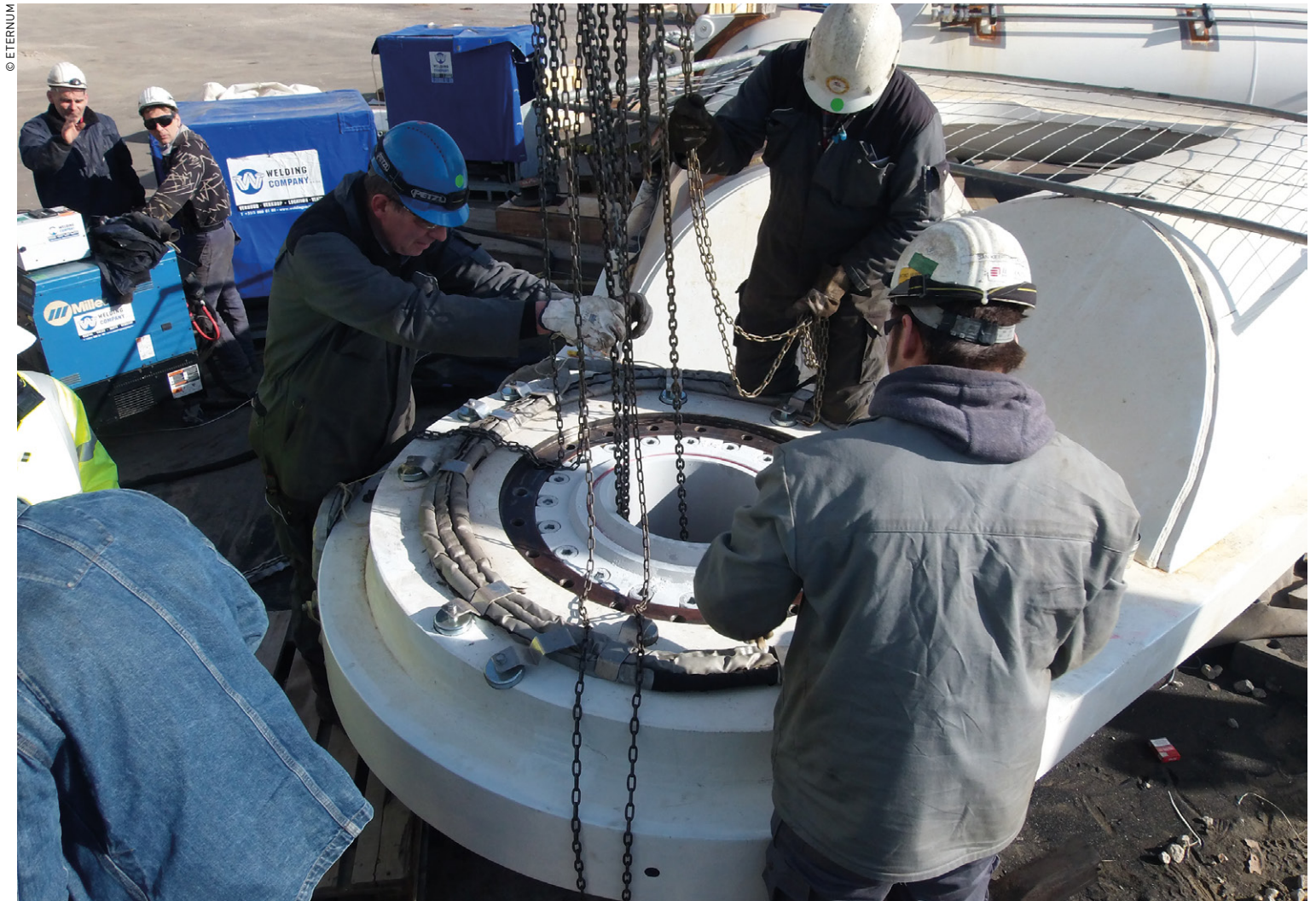
Selon Eichenberger,
le vide représente le plus
grand obstacle au fonctionnement
de la puissance de transmission
dans l'espace.

À la base, le produit phare du constructeur, le réducteur elliptique, a été inventé par un américain à la demande de la NASA pour équiper la jeep lunaire dans le cadre des missions Apollo 15 et 17. Le spatial est devenu la première branche d'activité du groupe qu'il continue toujours de servir,

Pour les environnements difficilement accessibles, Hydac a développé des accumulateurs hydropneumatiques sur mesure ne nécessitant aucune maintenance pendant la durée de vie de l'équipement.



© HYDAC



Les fortes pressions sous-marines peuvent atteindre plus de 3 000 kg par cm² selon Johan Tiellemans, dirigeant d'Eternum.

tage, fournit trois entraînements par vis à billes qui gèrent l'arrimage en orbite de la station spatiale internationale (ISS). Pour cette filiale de Festo, le vide représente également le plus grand obstacle au fonctionnement de la puissance de transmission dans l'espace : « Il agit sur tout ce qui est liquide ou peut s'évaporer. Cela comprend également les lubrifiants. Les graisses, solides sur terre, s'évaporent dans le vide spatial. C'est pourquoi les pièces mobiles doivent être capable de fonctionner sans lubrifiant malgré les exigences élevées en termes de durée de vie. »

De -50 à +90 degrés C

Les températures extrêmes représentent un autre défi. Pour la station d'arrimage, on compte entre -50 °C et +90 °C. En outre, la lumière ultraviolette, les rayons X, les particules à charge énergétique élevée et les atomes atmosphériques affectent la matière, qui est alors sujette à la corrosion. Eichenberger démontre que les bonnes performances des vis à billes Carry en inox permettent de résister à l'environnement

spatial sans présenter de traces d'usure ou de corrosion. Le roulage de filets par roulement à froid garantit une géométrie précise. Lors du roulage des filets, les fibres longitudinales de la matière, contrairement au meulage, au fraisage ou au tournage, ne sont pas coupées mais déviées. Il en résulte une surface comprimée, lisse et durable. Les ex-



Siam Ringspann est présent dans l'off-shore avec ses freins hydrauliques de la série H possédant des composants en inox.

cellentes propriétés de glissement de la vis à billes roulée à froid assurent un entraînement minimal et offrent une faible surface d'attaque par la saleté. Le traitement Hard-Inox-P permet de répondre aux exigences requises en matière de dureté de surface et de résistance à la corrosion de l'acier inoxydable. Ce procédé permet d'augmenter les performances de la structure des bords de l'acier inoxydable grâce à la nitruration* à température élevée. La dureté de surface atteint 550 à 750 HV avec une profondeur de trempe de 0,1 à 1,0 mm, ce qui prolonge la durée de vie des composants.

L'off-shore sous haute pression

Avec une part d'activité beaucoup plus importante que le spatial, le secteur off-shore — pétrole et gaz, principalement, mais aussi énergie hydraulique et éolienne — est soumis à des conditions extrêmes. Dans ce domaine, la problématique de la pression de l'eau est centrale. Bosch Rexroth tente de répondre à cette problématique : « Les équipements doivent fonctionner à de très grandes profondeurs (jusqu'à 3 000 mètres) et résister



KTR est présent dans le domaine maritime avec ses refroidisseurs OAC.

aux pressions énormes. L'expérience développée en matière d'équipements pour l'exploitation de champs pétroliers ou gaziers offshore a naturellement conduit au développement de solutions Subsea. Bosch Rexroth a ainsi enrichi sa gamme de composants hydrauliques et électrohydrauliques (valves, blocs de valves, centrales hydrauliques, vérins) pour répondre à ces applications. Par exemple, sur un bloc de valves, un compensateur à

de l'eau. Il faut alors élaborer des composants dans des matériaux qui comporte le moins d'impuretés ou de mini-fissures, afin d'éviter que des fluides ne s'y logent. Nous employons donc un certain type d'inox et tout ce qui est en contact avec cette boue devra être caractérisé. Ce sera par exemples le cas des actionneurs », indique François Porel (Hydro Leduc).

« Au fond de la mer existent de fortes pressions. Mais nos produits composites supportent ces charges. La qualité de base résiste à 325Nm en statique, ce qui correspond à plus de 3000 kg par cm² », précise Johan Tiellemans, dirigeant d'Eternum, spécialiste des technologies mécaniques et tribologiques.

Harmonic Drive s'est également positionné sur ce segment de marché : « Nous fournissons des actionneurs en quantité pour le off-shore sous-marin en grande profondeur en utilisant un servomoteur qui permet de faire fonctionner ce qu'on appelle un « arbre de Noël » (ensemble de vannes dans les puits de forage, de gaz ou de pétrole) rappelle Laurent Noraz. « Ces actionneurs robotisés permettent d'ouvrir et de fermer des vannes à 5 000 mètres de profondeur. Il nous a fallu développer des carters en titane pour assurer la résistance mécanique aux très grandes pressions. »

L'off-shore est aussi une spécialité du suisse Huber-Suhner. Pour Frank Thorn, chef du marché industrie, cet environnement « présente des conditions difficiles : températures élevées, agressions chimiques et rayons UV. Cela signifie que les câbles doivent être robustes et résister à l'épreuve du temps. Le dernier câble Radox OFL remplit cette tâche. Nos câbles

“ Le secteur off-shore

—pétrole et gaz, mais aussi

énergie hydraulique et éolienne—

est soumis à des pressions

extrêmes.

membrane permet d'équilibrer la pression exercée entre l'intérieur (pression hydraulique) et l'extérieur du bloc (pression de l'eau) » indique le groupe allemand.

Dans ce domaine, les courants et la présence de la glace posent d'autres problèmes. Mayr propose un catalogue de solutions (lire notre encadré). Le secteur pétrolier et gazier doit aussi répondre spécifiquement à la question des agressions chimiques. « La boue dans laquelle est emprisonné le pétrole constitue un environnement agressif. Elle contient notamment du sulfure d'hydrogène qui devient de l'acide sulfhydrique au contact



Les matériaux métalliques font donc l'objet de traitements de surface pour résister notamment aux fortes amplitudes thermiques.



Le cœur du système d'arrimage de la station spatiale internationale se compose de trois entraînements par vis à billes Carry type F (16 x 16) résistant à la corrosion.

Eternum : le composite résiste à l'usure

Innovation phare d'Eternum, le composite Eternum D-Glide est produit sous forme de coussinets, bagues à collettes, paliers lisses, rondelles, patins, guidages, crapaudines ou encore bagues hydrolubes. L'entreprise le présente comme « le composite de guidage le plus sûr et le plus résistant à l'usure sur le marché », qui « remplacera avantageusement le bronze, les matières à base plastique et même certains roulements, réduira drastiquement l'entretien, les besoins de graissage/lubrification, tout en augmentant la durée de vie. »

Selon Eternum, il est « idéal pour des applications en conditions difficiles et notamment les environnements immergé/humide/pollué. » Exemple : la rotule maritime. « Dans le domaine portuaire, maritime et off-shore (portes d'écluses et grues, grands constructions off-shore, stabili-



sateurs de navires), les rotules maritimes sont utilisées dans des embouts de vérins ou de cylindres hydrauliques, dans des tiges de tractions ou dans des charnières, pour compenser les défauts d'alignement de l'arbre avec le logement du palier » indique Johan Tiellemans, dirigeant d'Eternum France. « Dans des environnements humides et souillés, il est

difficile de maintenir des rotules fonctionnelles : joints et lubrifiants doivent être en excellent état pour les protéger. Avec un corps standard en acier inoxydable et l'entretoise en matériau composite antifriction D-Glide, aucune partie de la rotule n'est sujette à la corrosion. Avec des composants autolubrifiants, les rotules classiques doivent être changées une fois usées. Celles d'Eternum sont plus chères, mais il n'est pas nécessaire d'en changer tous les trois ans. »

ne montreront aucun signe de rupture, même après 10 à 12 ans, contrairement aux câbles en caoutchouc conventionnels. »

La technologie Radox propose des gaines possédant un seuil de température de base de 145°C, ce qui confère au câble une durée de vie prévue qui est huit fois plus longue que les câbles off-shore standard, qui résistent à 90°C. Les câbles Radox résistent ainsi aux contraintes mécaniques, chimiques ou de température.

Siam Ringspann est également présent dans l'off-shore : « Les freins hydrauliques de la série H possèdent des composants en inox et les surfaces de fonderies sont protégées par des peintures offshore, type C5M-H pour montage sur des treuils de navires ou des éoliennes marines », indique le groupe.



Les accouplements Rotex sont utilisés dans de nombreux groupes hydrauliques embarqués, ainsi qu'à l'intérieur du bateau.

Corrosion marine

Le secteur marin et le portuaire ont pour ennemi commun la corrosion, provoquée par l'atmosphère saline. « Le plus efficace est alors de réaliser des composants en inox, mais ce choix coûte cher. Des clients préfèrent alors repeindre les composants », constate Jérôme Lesoin (Webtec). Igus a lui aussi fait le choix de l'inox dans certains cas : « Les goulottes de guidage pour les chaînes utilisées dans les grues portuaires, par exemple », illustre Benoît Dos Santos, chef des ventes e-chain. Le groupe KTR conçoit pour sa part des composants d'entraînement dans ce domaine : accouplements utilisés en haute mer dans les entraînements principaux et auxiliaires et dans tous types d'équipements de pont.

© EICHENBERGER

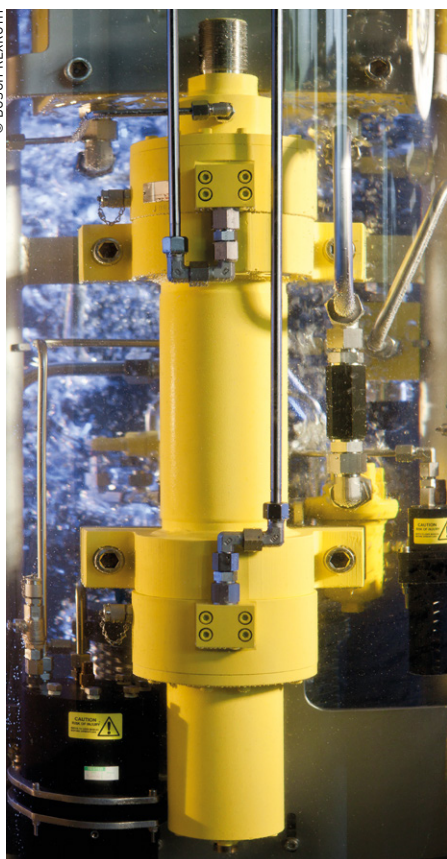


La technologie développée par Eichenberger, à savoir le roulage de filets (formage à froid de l'enveloppe de pièces rondes), allie une capacité de charge et une densité énergétique optimales avec une forte dynamique et une précision élevée à puissance maximale.

Les premiers sont des composants pour l'hydraulique embarquée. « Les accouplements Rotex sont utilisés dans de nombreux groupes hydrauliques embarqués, ainsi qu'à l'intérieur du bateau. La simplicité d'installation est intéressante pour le montage, en association avec un

boîtier KTR Bell. Les carters KTR Bell en fonte conviennent aux applications marines, et résistent aux charges élevées et à l'agressivité de l'eau de mer sur le long terme » indique le groupe. La seconde catégorie de composants sont les refroidisseurs OAC : « Nous proposons des refroidisseurs huile-air et huile-eau résistants à l'eau de mer. Les refroidisseurs huile-air compacts OAC destinés au refroidissement haute puissance de fluides hydrauliques et de lubrifiants sont revêtus d'une peinture anti-corrosion KTL, appliquée au trempé** pour les applications marines. Ces refroidisseurs sont ainsi très bien protégés de l'oxydation, même au niveau de zones difficiles d'accès comme les ouïes. En outre, ils font appel à des moteurs électriques à classe de protection IP 56. Les exigences sont encore plus élevées pour les refroidisseurs huile-eau à radiateur et tubulure TAK/T, en contact avec l'eau de mer. Pour ces applications, nous n'utilisons que des matériaux résistants à la corrosion saline. »

© BOSCH REXROTH



Bosch Rexroth a enrichi sa gamme de composants hydrauliques et électrohydrauliques (valves, blocs de valves, centrales hydrauliques, vérins) pour répondre aux applications extrêmes.

“ Le minier est un secteur qui peut présenter des caractéristiques extrêmes, dues à l'humidité élevée et à la poussière, ce qui nécessite de rendre les composants étanches contre la corrosion.

Le minier est également un secteur qui peut présenter des caractéristiques extrêmes. « Dans les mines, le degré d'humidité est souvent élevé et il y a aussi beaucoup de poussière. Il faut donc rendre les composants étanches en renforçant la protection anti-corrosion, surtout pour les limiteurs de couple et les freins de sécurité. Ils doivent parfois aussi répondre aux exigences des environnements ATEX. Tous ces produits peuvent être réalisés en exécutions spéciales », note pour sa part Dominique Becker, directeur commercial de Mayr France.



L'allemand Igus, spécialiste des paliers et portes-câbles, ne fait pas de sur-mesure, mais s'adapte aux demandes.

L'aéronautique et ses défis

Dernier grand secteur: l'aéronautique, soumis évidemment à des conditions climatiques extrêmes, mais pas uniquement. « Nos composants sont partout dans un avion. Or, l'amplitude thermique peut être très forte: sur les aéroports de pays d'Extrême-Orient, il peut faire jusqu'à +80 degrés au soleil puis, après le décollage, la température chute à -70 degrés. Il y a aussi la corrosion. Les matériaux métalliques font donc l'objet de traitements de surface. Ceux-ci ont d'ailleurs été récemment modifiés pour des raisons environnementales à travers la réglementation Reach. Par exemple, le cadmiage a été remplacé par du zinc-nickel. Il y a aussi les matériaux à base de fibre de carbone et de résine qui, au-delà de leur légèreté, apportent une résistance à la corrosion », note Yves Mahéo, directeur du développement de produits aéronautiques chez SKF. L'américain Beswick met aussi l'accent sur son excellence en termes de températures extrêmes: « Nous avons ajouté des élastomères en option pour répondre aux besoins en termes d'exposition à ce type de conditions. »

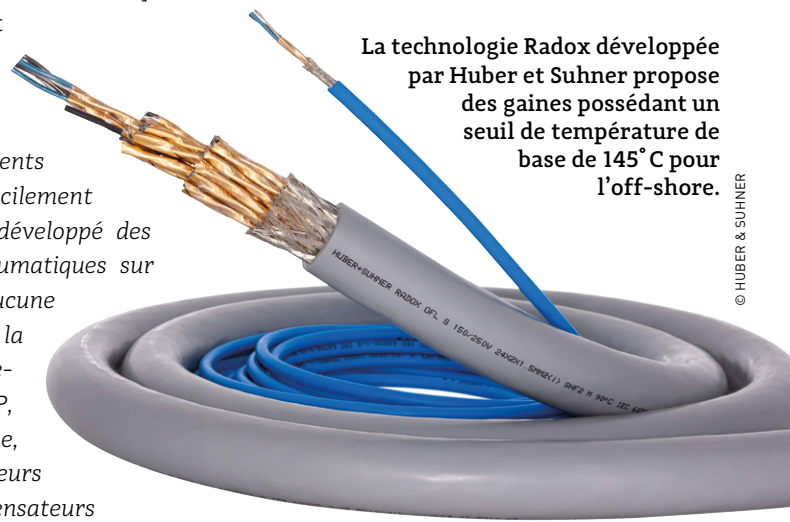
Hydro Leduc est aussi présent de longue date sur ce marché: « En aéronautique, il faut résister aux brouillards salins, soit avec des composants directement en acier inoxydable, soit avec un dépôt chimique sur les pièces en aluminium pour les protéger », indique François Porel.

Si chaque secteur est particulier, il y a un point commun dans le domaine de l'extrême: la difficulté de maintenance et d'entretien lié à la difficulté d'accès, ainsi que le confirme Hydac présent dans la marine, le pétrole et gaz, l'aérospatial, le minier et l'éolien: « Pour les environnements difficiles et/ou très difficilement accessibles, nous avons développé des accumulateurs hydropneumatiques sur mesure ne nécessitant aucune maintenance pendant la durée de vie de l'équipement. Notre filiale QHP, spécialisée dans le domaine, propose des accumulateurs à vessie, piston et compensateurs

pouvant travailler jusqu'à 1500 bars et immergés à plus de 3000 mètres. »

Onéreux et customisé

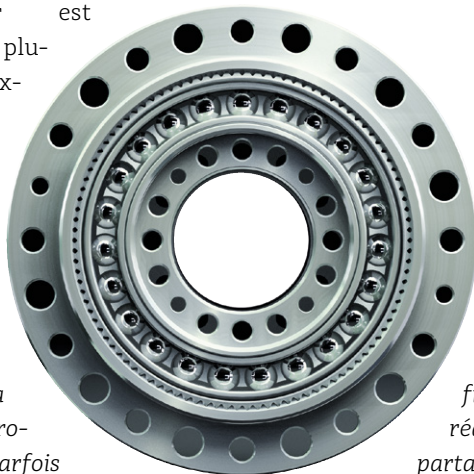
Les fabricants de composants répondent à ces contraintes en fonction des demandes de leurs clients, formulées dans un cahier des charges qui, compte tenu de l'aspect particulier de ces environnements, doit répondre à un certain nombre de réglementations très strictes.



La technologie Radox développée par Huber et Suhner propose des gaines possédant un seuil de température de base de 145° C pour l'off-shore.

© HUBER & SUHNER

Chaque secteur est confronté à un ou plusieurs paramètres extrêmes, mais une constante demeure : les composants prévus pour ces conditions extrêmes coûtent toujours cher. « Ces applications nécessitent la mise en œuvre de produits spécifiques parfois très onéreux. Et je ne constate pas de pression plus forte sur les prix lors de ces dernières années, même si le prix est toujours un élément décisif. Lorsqu'un client de ce type vient nous voir, il sait que nous sommes presque les seuls à pouvoir répondre à sa demande », note Dominique Becker.

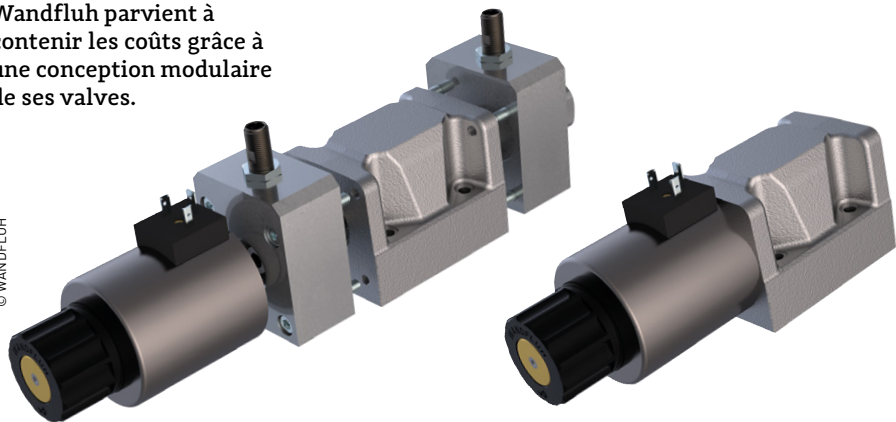


© HARMONIC DRIVE

Le réducteur CPL a été développé spécifiquement pour les environnements extrêmes comme le spatial.

«... fiques, nous pouvons réaliser un produit en partant de 0 », explique François Porel, directeur technologique au sein d'Hydro Leduc. Même son de cloche chez Webtec : « Nous customisons les produits, c'est même notre cheval de bataille. Et les clients pour lesquels nous développons une application de A à Z exigent parfois de garder la propriété intellectuelle du produit », déclare

Wandfluh parvient à contenir les coûts grâce à une conception modulaire de ses valves.



© WANDFLUH

Pierre Fabro, directeur commercial chez Wandfluh, apporte toutefois un correctif : « Grâce à la conception modulaire de nos valves, notre grande expérience et au fait que le développement, la conception et les lignes de production se trouvent dans le même bâtiment, les adaptations aux demandes des clients peuvent généralement être mises en œuvre facilement et de manière peu coûteuse. »

Du sur-mesure

Si le coût élevé de ces composants reste toutefois la tendance globale, le processus de réponse peut varier d'un industriel à l'autre. « Nous n'avons pas de gammes de produits standardisés pour ces environnements particuliers, plus une palette de savoir-faire de nos meilleures technologies que nous optimisons pour chaque client. Et dans des cas très spéci-

Jérôme Lesoin, responsable commercial de la filiale française de Webtec.

L'allemand Igus, spécialiste des paliers et portes-câbles, ne fait pas de sur-mesure, mais sait s'adapter, ainsi que le confirme Benoît Dos Santos, chef des ventes e-chain : « Igus essaye de répondre avec ses produits catalogues, mais des adaptations spécifiques à ces environnements extrêmes sont possibles en fonction de ce que demande le client. »

L'électronique de plus en plus présente

Quel avenir se dessine-t-il pour ces composants de l'extrême ? Selon Bosch Rexroth, « on peut imaginer l'arrivée de matériaux légers, faciles à travailler, résistants à la corrosion grâce au développement de composants dans de nouveaux matériaux : textile, kevlar ou résines. »



Les composants doivent s'adapter à des situations qui rendent difficile leur fonctionnement : travail en haute altitude, dans l'espace, sur l'océan ou dans ses profondeurs, en sous-sol, dans des atmosphères explosives ou poussiéreuses.

Omerin, les câbles tous terrains

Le fabricant français Omerin est l'un des plus importants fabricants de fils et câbles électriques de spécialités. « La majorité de nos produits est destinée à des situations extrêmes. Nous sommes présents dans l'aéronautique, le spatial, les mines, la construction navale, le ferroviaire, le pétrole et le gaz, les sites ATEX. Nous pouvons développer des produits sur mesure, mais si le volume potentiel de production est important et le marché récurrent, nous créons un produit ou une gamme spécifique » indique Pierre Sanvoisin, directeur général du groupe. « Certains de nos produits peuvent supporter des conditions climatiques extrêmes avec des câbles pour basses et hautes températures (de -190 à +1 400 degrés Celsius), mais aussi des contraintes physico-chimiques. Ils sont résistants au feu, à la corrosion. Nous employons pour cela des matériaux spécifiques : sans halogène (risque d'incendie et de toxicité des gaz émis) et combinaison de tresses en fibre de

verre ou fibre minérale et de polyimide, mica et fluoropolymères (ETFE, FEP, PFA, PTFE) et élastomère de silicone, un isolant d'exception (neutre, inerte, souple et résistant aux hautes et basses températures). Nos gammes de câbles Silicable, Siliflon, Siliflam et Pyrisol sont une réponse à la majorité des exigences spécifiques de ces marchés. La gamme Enersyl est plus particulièrement adaptée aux centrales d'énergie et sites à risques. La gamme Cerafil, fil miniature isolé en céramique résistant à de très hautes températures, est utilisée dans l'aérospatial, ainsi que la gamme Silicoul, câbles d'énergie moyenne tension (1.1 Kv, 3.7 Kv, 6.6 Kv et 13.8 Kv) hautes températures, notamment utilisés dans les alternateurs d'éoliennes. Enfin, notre filiale Flexelec a développé une gamme complète de câbles chauffants Flextrace pour le traçage électrique en environnement extrême, dont ATEX (câbles auto-régulant, câbles à puissance constante, câbles série pour traçage longue distance). »

De même, « la tendance à l'électrification de l'hydraulique observée depuis quelques années a pour conséquence le fait que le contrôle des mouvements est de plus en plus assuré par l'électrique ou l'électronique, et de moins en moins par l'hydraulique pure. L'électronique embarquée sur nos composants devra donc encore gagner en résistance. Cette évolution rendra possible une généralisation de l'électronique embarquée très résistante aux conditions extrêmes. »

François Porel anticipe une évolution technologique dans la fabrication additive : « Cela permettra d'ajouter des fonctions et des renforts en matériaux seulement où ce sera nécessaire. Il ne sera plus nécessaire d'avoir des pièces entièrement inoxydables. Ce sera moins complexe et moins cher. »

De l'avis de Siam-Ringspann, le travail sur les alliages pourrait fournir les prochaines innovations : « L'évolution des matériaux, des traitements de surface et des composants électroniques toujours plus performants nous offrent sans cesse des possibilités d'amélioration des composants mécaniques.

“ L'avenir des composants

soumis à conditions extrêmes

passera par une électronique

embarquée plus résistante, de

nouveaux alliages et le recours à

la fabrication additive.

Pour preuve, les progrès dans le domaine de la métallurgie nous ont permis de mettre au point des roues libres fabriquées avec des aciers inoxydables ayant des caractéristiques mécaniques quasiment identiques aux aciers traditionnels, mais avec des durées de vie incomparables dans des environnements corrosifs! » ■

Hugues BOULET

* La nitruration est un traitement de surface qui consiste à incorporer de l'azote dans la couche superficielle d'un acier, pour en modifier les propriétés mécaniques.

** Au trempé : méthode qui consiste à déposer un revêtement organique (peinture) par immersion et émergence des pièces métalliques dans une cuve aux dimensions appropriées.