

Aciers inoxydables
et alliages pour les
applications

H₂



ENGINEERED
BY
Aperam
INNOVATION
LAB
ENGINEERED

Faites passer vos solutions H₂
au niveau supérieur
grâce à l'expertise et aux matériaux d'Aperam

Acier Inoxydable à hautes performances, services, innovation et expertise en développement durable

Aperam est un producteur mondial d'aciers inoxydables, d'aciers électriques, d'alliages, d'aciers spéciaux ainsi qu'un acteur majeur du recyclage. Avec six principaux sites industriels en Europe et en Amérique du Sud, l'entreprise propose une gamme complète de nuances et de dimensions pour des applications industrielles exigeantes. Son modèle intégré garantit la fiabilité des produits, l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement et une qualité constante.

Au-delà de la fourniture de matériaux, Aperam propose des services techniques avancés : personnalisation dimensionnelle, assistance au formage et au soudage, ainsi qu'une logistique en flux tendu. Son réseau de Centres de Services et d'unités de transformation répond aux besoins spécifiques des clients dans plus de 40 pays.

L'Aperam Innovation Lab joue un rôle clé dans le développement de nouveaux matériaux et la co-conception de solutions avec les clients. Des études de faisabilité aux essais industriels, les équipes R&D mobilisent une expertise approfondie en métallurgie, science de la corrosion et optimisation des procédés.

Acteur de la métallurgie circulaire, Aperam déploie un modèle de recyclage en boucle fermée via sa division Recycling & Renewables. Son approche bas carbone repose sur l'utilisation de charbon certifié FSC® et de matières premières issues de la ferraille. Les nuances d'acier inoxydable de la gamme Aperam infinite™ permettent jusqu'à 85 % de réduction des émissions de CO₂ par rapport à la moyenne du secteur, contribuant à la réduction des émissions de scope 3 de ses clients et à leur alignement avec les objectifs de la taxonomie européenne.

Libérer le potentiel de l'hydrogène par l'innovation matériau

Un secteur guidé par la performance, la sécurité et la maîtrise des coûts

Dans le contexte international actuel, les industriels sont soumis à une pression croissante pour réduire les coûts d'approvisionnement en matériaux et accélérer la mise sur le marché. La volatilité des prix des matières premières, tout comme les coûts cachés liés à des dysfonctionnements de production ou à une sur-spécification technique, peuvent peser lourdement sur les marges. Parallèlement, les clients attendent des matériaux durables, faciles à intégrer et compatibles avec des cycles d'innovation de plus en plus courts. Les utilisateurs d'aciers inoxydables ou d'alliages doivent donc réévaluer leurs choix matériaux — une démarche qui requiert une vision claire des conséquences techniques et opérationnelles. Faire les bons arbitrages suppose une compréhension fine à la fois des exigences de performance et des structures de coûts.

Aciers inoxydables et alliages : des leviers essentiels

Des électrolyseurs aux piles à combustible, des réservoirs d'hydrogène liquide aux systèmes pipe-in-pipe, les aciers inoxydables et les alliages de haute performance jouent un rôle central dans de nombreuses applications. Leur comportement mécanique à -253 °C , leur résistance à la corrosion en milieu hydrogène, ainsi que leurs excellentes aptitudes au formage et au soudage en font des matériaux de référence pour le développement d'infrastructures hydrogène à la fois sûres et efficaces.

Aperam : l'expertise matériau au service de solutions hydrogène compétitives

Avec une gamme complète d'alliages au nickel et d'alliages spéciaux – incluant l'INVAR® M93, le Ni201, ainsi que des nuances d'acier inoxydable telles que 316L, 316A, 309N, 310S, 904L, DX2205, K45, K44M et K46 – Aperam couvre l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène. Grâce à son expertise métallurgique, à ses capacités avancées en R&D et à un accompagnement ciblé sur les applications, Aperam aide ses partenaires à définir la solution la plus pertinente, conciliant exigences de performance, maîtrise des coûts et durabilité.

Électrolyseurs –

Des solutions pour toutes les technologies

Le paysage de la production d'hydrogène évolue rapidement, avec plusieurs technologies d'électrolyse désormais déployées à l'échelle industrielle. Chacune présente des contraintes spécifiques — températures extrêmes, milieux corrosifs, perméabilité au gaz — qui rendent **le choix du matériau déterminant**. Un matériau inadapté peut entraîner des défaillances prématurées, affectant l'efficacité, la fiabilité et la rentabilité des systèmes. Pour accompagner cette transition, Aperam propose un large portefeuille d'aciers inoxydables et d'alliages au nickel, conçus pour répondre aux exigences propres à chaque technologie d'électrolyse, quels que soient leur principe de fonctionnement ou leur niveau de maturité.

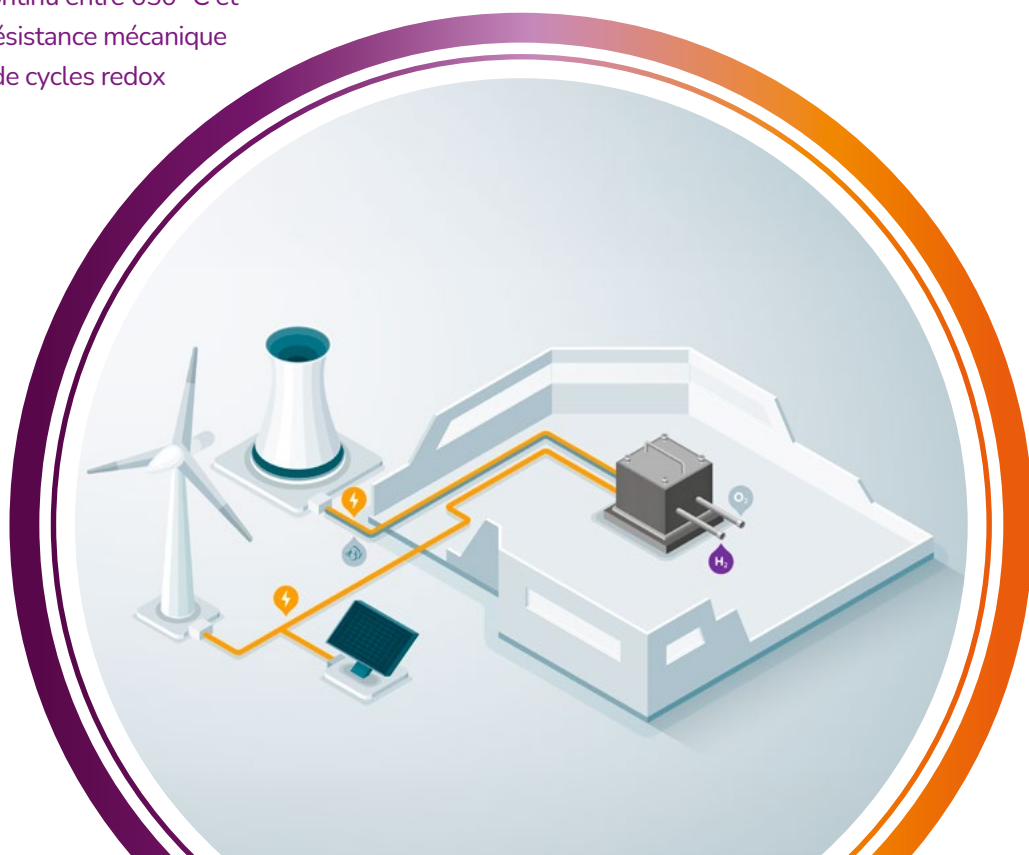
Électrolyseurs à oxyde solide (SOEC) : un préalable à l'efficacité

Le procédé SOEC se distingue par son rendement élevé et son fonctionnement à haute température, ce qui en fait une solution à fort potentiel pour la production d'hydrogène de base à grande échelle. Il présente toutefois des défis spécifiques : fatigue thermique, oxydation à haute température, perméabilité au gaz et compatibilité avec les revêtements. Les matériaux doivent pouvoir fonctionner en continu entre 650 °C et 850 °C, tout en conservant leur résistance mécanique et en résistant à l'oxydation lors de cycles redox alternés.

Pour répondre aux exigences des SOEC, Aperam a développé :

- **IMPHY® 2350**, un alliage offrant une haute résistance au fluage et à l'oxydation à haute température, réduisant le risque de défaillance prématurée des interconnecteurs,
- Une gamme complète de nuances **ferritiques (K41, K44M, K45 et K46)**, optimisées pour les interconnecteurs, les plaques d'extrémité et les pièces de la zone chaude (**309N, 310S** et l'alliage **IMPHY 625**), assurant une excellente stabilité dimensionnelle et une fiabilité mécanique à haute température.

Nos matériaux sont co-développés avec les concepteurs de stacks pour garantir leur compatibilité avec les contraintes d'assemblage, les cycles thermiques, la diffusion des gaz et les exigences de durée de vie — une condition essentielle pour l'industrialisation fiable de cette technologie à fort potentiel.



Alcalin (AEL) : Une technologie éprouvée – et en constante évolution

Les électrolyseurs alcalins sont la technologie d'électrolyse la plus établie, offrant une solution fiable et compétitive pour la production d'hydrogène à grande échelle. Même ces systèmes matures doivent néanmoins relever plusieurs défis techniques : **durées de fonctionnement prolongées, conductivité sous courant élevé, et résistance dans des milieux fortement basiques.**

Les composants tels que les électrodes, les séparateurs et les cadres nécessitent des matériaux alliant excellente résistance à la corrosion et stabilité des performances électriques sur plusieurs dizaines de milliers d'heures.

Aperam accompagne les fabricants de systèmes alcalins avec une gamme dédiée de nuances à base de nickel et d'aciers inoxydables, incluant :

- **Ni201**, destiné aux composants haute pureté tels que les électrodes et les plaques bipolaires,
- des nuances austénitiques telles que **316L** et **316A**, ainsi que **304M**, **305**, **316B**, **310S** et **904L**, conçues pour résister à la corrosion caustique tout en offrant une bonne aptitude au formage et au soudage,
- des nuances duplex notamment **DX2205**.

En associant conductivité, résistance mécanique et optimisation des coûts, nos matériaux contribuent à réduire le coût total de possession. Grâce à notre approche de co-ingénierie et à nos capacités d'essais avancées, nous accompagnons les fabricants de systèmes alcalins dans l'exploration de **nouvelles conceptions, de composants plus fins et de techniques de formage évoluées** – sans compromis sur la durabilité ni sur les performances.

PEM et AEM : équilibre entre performance, résistance à la corrosion et coût

Les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) sont appréciés pour leur compacité et leur flexibilité de fonctionnement, ce qui les rend particulièrement adaptés aux énergies renouvelables intermittentes. Cependant, leur fonctionnement en milieu fortement acide requiert des matériaux à la fois résistants à la corrosion et conducteurs. Les nuances austénitiques et duplex d'Aperam, telles que **316L**, **316A**, **904L** et **DX2205**, assurent une stabilité à long terme tout en optimisant les coûts matériaux. Elles permettent également de limiter le recours aux métaux nobles et d'améliorer la formabilité pour des composants minces comme les plaques bipolaires ou les collecteurs de courant.

Forte de plusieurs décennies d'expérience dans le développement de revêtements pour plaques bipolaires destinées aux technologies PEMFC, Aperam se positionne comme un partenaire clé pour les fabricants de systèmes PEM. Nous mobilisons cette expertise pour guider nos clients dans le choix du substrat le plus adapté, garantissant une compatibilité optimale entre le matériau de base et le revêtement fonctionnel. Cela implique des recommandations précises sur :

- La composition chimique : ajuster l'alliage pour résister à l'environnement acide spécifique aux PEM,
- L'état de surface : optimiser la topographie pour une adhérence et des performances de revêtement renforcées,
- La structure métallographique : assurer une intégrité mécanique et électrochimique durable.

Les électrolyseurs à membrane échangeuse d'anions (AEM) représentent une alternative prometteuse, combinant coûts matériaux réduits et efficacité électrochimique satisfaisante. En s'appuyant sur son retour d'expérience avec les PEM, Aperam soutient les développeurs AEM en proposant des **nuances inox sur mesure**, alliant résistance à la corrosion, aptitude au soudage et qualité de surface, adaptées aux prototypes et unités pilotes.

Balance of Plant

Conçu pour la fiabilité et la performance

Échangeurs thermiques

Les systèmes hydrogène opèrent fréquemment dans des conditions thermiques sévères. Dans les unités SOEC et SOFC, par exemple, les échangeurs de chaleur doivent supporter des températures élevées et des environnements corrosifs, tout en assurant une bonne conductivité thermique et une stabilité dimensionnelle durable. Les matériaux sont exposés à de la vapeur humide, du CO₂ et des condensats acides, générant des risques de corrosion intergranulaire et de fluage à long terme.

Aperam propose :

- **Des alliages haute température** : 309N, 309, 310S — résistants à l'oxydation et aux chocs thermiques,
- **Des inox austénitiques résistants à la corrosion** : 316A, 316L, 316Ti, 321 — assurant l'intégrité à long terme dans des conditions de fonctionnement variables,
- **L'alliage IMPHY® 625** : conçu pour les sollicitations thermiques extrêmes et des environnements fortement corrosifs.

Ces matériaux sont sélectionnés pour leur aptitude à maintenir leurs propriétés mécaniques, à limiter le fluage et à garantir une durabilité élevée, même en conditions cycliques ou en atmosphère saturée en vapeur. Ils permettent des conceptions plus compactes et contribuent à réduire les risques de maintenance non planifiée ou de défaillance prématurée.

Enveloppe

Les matériaux d'enveloppe doivent assurer à la fois l'intégrité structurelle et la résistance chimique, notamment à haute température et en contact direct avec l'hydrogène ou l'air humide. Les composants tels que boîtiers, cadres ou capots de protection sont exposés à des contraintes mécaniques, à des températures élevées et à des cycles répétés de fermeture et d'étanchéité.

Les solutions Aperam incluent :

- **Des nuances austénitiques et ferritiques** (notamment 309N, 310S, K44M, K41 pour les zones chaudes) combinant une bonne aptitude au formage et soudabilité,
- **L'alliage IMPHY® 625**, conçu pour résister aux hautes températures dans une large variété de milieux corrosifs,
- **Des nuances renforcées contre le fluage et l'oxydation**, telles que IMPHY® 600 et 601, adaptées aux cycles de fonctionnement prolongés,
- Des options adaptées au formage de grande dimension et aux tolérances serrées, indispensables pour l'assemblage de systèmes modulaires.

Les aciers inoxydables et alliages proposés par Aperam permettent des conceptions mécaniques robustes, même pour des géométries complexes, avec un haut niveau de fiabilité à long terme.

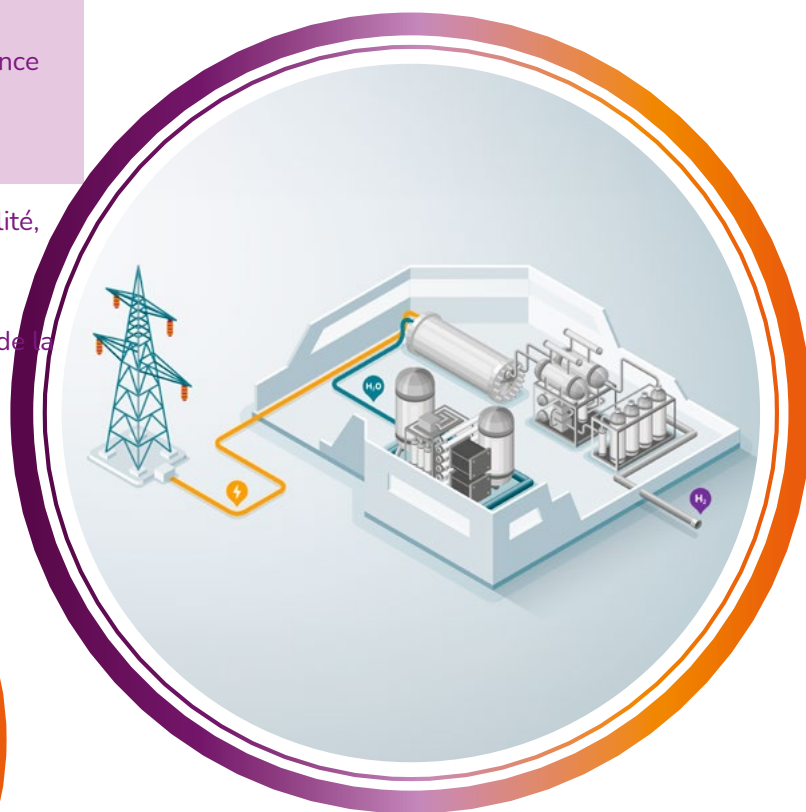
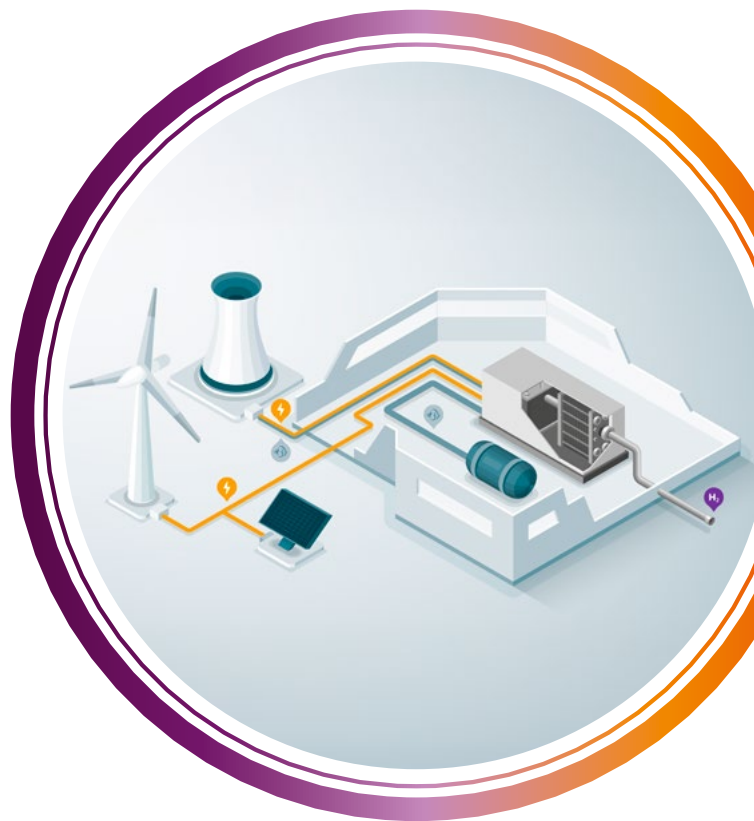
Tubes et tuyaux de petit diamètre

Qu'il s'agisse de la circulation des gaz, de conduites d'eau déminéralisée ou de boucles de récupération thermique, les systèmes hydrogène requièrent des tubes de petit diamètre capables de supporter la pression, les vibrations et la corrosion interne. Ces composants doivent également un contrôle précis de l'état de surface et une propreté intérieure rigoureuse, afin d'éviter tout risque de contamination du système.

Aperam fournit des tubes de précision et tuyaux de petit diamètre fabriqués à partir de :

- **Aciers inoxydables austénitiques** : 316L, 304M, 304L, 305, 316B, 316A – combinant résistance à la corrosion et facilité de transformation,
- **Alliages au nickel** : Ni201 – pour leurs propriétés de conductivité et leur tenue en milieu alcalin,
- **Nuances duplex** : apportant une résistance mécanique supérieure et permettant la réduction de l'épaisseur de paroi.

Nos nuances sont optimisées pour la soudabilité, l'intégrité sous pression et la résistance à la fragilisation par l'hydrogène, assurant des connexions sûres et étanches sur l'ensemble de la plage de fonctionnement.



Transport, stockage et distribution

Des matériaux pour des conditions extrêmes

Transport et distribution

L'hydrogène doit pouvoir circuler en toute sécurité tout au long de la chaîne de valeur – des sites de production jusqu'aux unités de stockage et aux utilisateurs finaux. Sous forme gazeuse, il est stocké et transporté à des pressions pouvant atteindre 700 bar ; sous forme liquide, sa température descend jusqu'à -253°C . Dans les deux cas, les matériaux sont soumis à des sollicitations de fatigue, à des risques de perméation, ainsi qu'à des contraintes liées aux écarts de dilatation thermique.

Aperam propose :

- **Tuyaux et tubes** en 304L, 316L, 304M, 305, 316A et Duplex — pour un compromis optimal entre performance mécanique et maîtrise des coûts,
- Systèmes **pipe-in-pipe** intégrant INVAR® M93, dont l'ultra-faible dilatation thermique est idéale pour les transferts cryogéniques,
- Un accompagnement complet pour la qualification des **tubes soudés** et les essais de tenue en condition cryogénique.

Ces solutions associent résistance mécanique, soudabilité, résistance à la perméation de l'hydrogène et tenue à la fatigue, garantissant des infrastructures fiables pour le transport d'hydrogène, en haute pression comme en cryogénie.

Réservoirs cryogéniques & unités de stockage

Le stockage de l'hydrogène liquide impose des conditions extrêmes. Les matériaux utilisés, exposés à -253°C , doivent maintenir leur ductilité, leur résistance à la fatigue et une stabilité dimensionnelle rigoureuse. Même de légères déformations peuvent compromettre l'efficacité de l'isolation et la sécurité du système.

Aperam fournit :

- **Des austénitiques qualité cryogénique** : 304L, 304M, 316L, 316B, 316A — éprouvés pour leur tenue aux cycles cryogéniques, complétés par une nouvelle gamme de nuances offrant d'excellentes performances à très basse température, tout en réduisant les risques de fragilisation par l'hydrogène et les coûts des produits finis,
- **INVAR® M93** : pour sa faible dilatation thermique et sa résistance élevée à la fatigue en environnement cryogénique,
- **Des performances validées** jusqu'à 20 K (-253°C), avec maintien des propriétés mécaniques sous contraintes dynamiques.

Ces matériaux permettent la conception de réservoirs cryogéniques plus sûrs, plus durables, avec moins de pertes par évaporation réduites et un risque minimal de microfissuration.



Stockage statique et mobile

Des réservoirs industriels fixes aux remorques hydrogène embarquées, en passant par les stations mobiles de ravitaillement, chaque application présente des exigences spécifiques – qu'elles soient réglementaires, mécaniques ou thermiques. Les matériaux doivent supporter des pressions de service élevées, résister à la fragilisation par l'hydrogène et rester facilement formables à l'échelle industrielle.

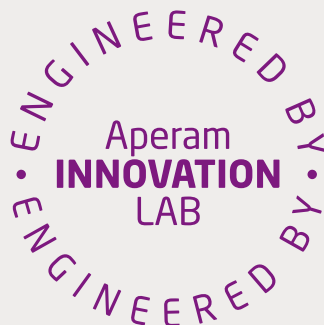
Aperam propose :

- **Des nuances austénitiques** : 304L, 316L, 304M, 305, 316B, 316A — adaptées aux liners et à l'enveloppe sous pression,
- **Une aptitude au soudage validée** et une compatibilité éprouvée avec les environnements hydrogène,
- **Un accompagnement à la conformité pression**, incluant l'évaluation de la durée de vie en fatigue et des protocoles de contrôle non destructif.

Ces solutions permettent aux opérateurs de la logistique hydrogène de répondre aux exigences croissantes en matière de sécurité, de durabilité et de réduction de l'empreinte carbone, aussi bien sur les installations fixes que mobiles.

Nouvelles nuances – Développées par l'Aperam Innovation Lab

- **316A**: certifiée pour une large gamme d'applications, cette nuance permet une réduction allant jusqu'à 25 % de l'extra d'alliage. Véritable solution plug-and-play, elle peut remplacer le 316L sans nécessiter de modification des procédés de production existants,
- **K45, K44M et K46** : issues de la gamme ferritique KARA®, ces nuances allient résistance à la corrosion et excellente tenue à haute température, ce qui les rend particulièrement performantes dans les environnements exigeants des électrolyseurs SOEC.



Bien plus que des matériaux

L'Innovation Lab pour une co-innovation avec nos partenaires

Chez Aperam, nous faisons bien plus que produire des aciers inoxydables et des alliages de haute performance. Grâce à notre **Innovation Lab**, nous collaborons étroitement avec nos clients pour accélérer le développement d'applications hydrogène performantes. **De la caractérisation en laboratoire aux essais à l'échelle industrielle**, nous accompagnons chaque étape du processus d'innovation par le **co-design**, la **validation technique** et la **qualification des matériaux**, dans des conditions représentatives des usages finaux.

Forts de notre **solide expérience en cryogénie** — notamment dans le transport de gaz naturel liquéfié — et d'une vaste base de données de performances, nous contribuons à **réduire les délais de qualification** et à orienter le choix des matériaux pour les environnements les plus exigeants. Qu'il s'agisse de corrosion, de fatigue, de résistance thermique ou de fragilisation par l'hydrogène, notre expertise combinée constitue un atout décisif.

En réunissant les **compétences complémentaires de nos divisions Stainless et Alloys**, Aperam propose une **approche intégrée unique**, capable de recommander la **solution matière la plus adaptée**, en s'appuyant sur l'ensemble de nos technologies de production et notre savoir-faire métallurgique.

Nous travaillons **en toute transparence**, main dans la main avec nos clients, afin d'identifier des solutions garantissant **qualité, durabilité et performance** — tout en optimisant les **coûts matière et le coût total de possession (TCO)** sur l'ensemble du cycle de vie des applications.

Notre offre inox

	Appellation commerciale	Normes			C	Si
		AISI	UNS	EN		
Austénitiques	Aperam 304L	304L	S30403	1.4307	0,025	0,40
	Aperam 304M	304L	S30403	1.4306	0,025	0,40
	Aperam 305	305	S30500	1.4303	0,025	0,40
	Aperam 321	321	S32100	1.4541	0,025	0,40
	Aperam 316A	—	S30416	1.4682	0,02	1,00
Austénitiques avec molybdène	Aperam 316L	316/316L	S31600/S31603	1.4401/1.4404	0,025	0,40
	Aperam 316B	316L	S31603	1.4435	0,02	0,40
	Aperam 316T	316Ti	S31635	1.4571	0,035	0,40
	Aperam 904L	904L	N08904	1.4539	0,015	0,40
Austénitiques au manganèse	Aperam 309	309	—	1.4828	0,05	1,60
	Aperam 309N	309N	S30815	1.4835	0,08	1,60
	Aperam 310S	310S	S31008	1.4845	0,05	0,60
Duplex	DX2101	21-01	S32101	1.4162	0,025	—
	DX2202	22-02	S32202	1.4062	0,025	0,40
	DX1803 / DX2205	22-05	S32205	1.4462	0,020	0,30
	DX2304	23-04	S32304	1.4362	0,020	0,40
	DX2507	25-07	S32750	1.4410	0,020	—
Ferritiques KARAK key for value	K41	441	S43932/S43940	1.4509	0,015	0,60
	K44M	444	S44400	1.4521	0,015	0,40
	K45	445	S44500	1.4621	0,015	0,25
	K46	446	à venir	1.4620	0,015	0,15

Formats disponibles (selon la nuance) : bobines, bobineaux, tôles, tubes.

”

Chez Aperam Stainless et Aperam Alloys Imphy, notre activité s'inscrit au cœur de l'innovation dans l'écosystème complexe de l'hydrogène.

En mobilisant les capacités industrielles et les expertises du groupe Aperam, Aperam Alloys Imphy est désormais en mesure de produire des matériaux spéciaux hautement alliés de grandes dimensions.

Cette avancée ouvre d'importantes perspectives tout en consolidant notre position de référence en matière de recherche et développement dans ce domaine stratégique.

Ralf Behle, Business Development Manager

”

Aperam accompagne l'accélération de la transition énergétique en soutenant le développement de l'économie de l'hydrogène. Forts de plusieurs décennies d'expertise dans les secteurs du pétrole & gaz et de la chimie, nous collaborons étroitement avec les principaux fabricants d'électrolyseurs et de systèmes BoP pour co-développer des solutions matériaux sur mesure, incluant de nouvelles nuances spécifiquement conçues pour optimiser le Coût Total de Possession (TCO). Notre objectif : réduire les coûts de production et contribuer, aux côtés de nos partenaires, à structurer une filière hydrogène pérenne et compétitive.

Adolfo Kalergis, Head of New Energy & Hydrogen

”

Notre offre alliages

Propriétés	Appellation commerciale	Normes					Composition chimique
		ASTM	DIN	UNS	ALLIAGE	AWS	
Résistance à la corrosion	Ni201 (IMPHY N99)	B162		N02201	2.4066, 2.4068	5,15	Ni
Contrôle de la dilatation	INVAR M93	A658, F1684	1715	K93603			Fe Ni36
Résistance aux hautes températures	IMPHY 23S0			S44535	1.4760		Fe Cr23 La
	IMPHY 600, 600 LC	B166, B168, B564		N06600	2.4816, 2.4817	5,14	Ni Cr16 Fe8
	IMPHY 601	B166, B168		N06601	2.4851	5,14	Ni Cr23 Fe14 Al1.5
Résistance à la corrosion	IMPHY 625	B443 B446		N06625	2.4831, 2.4856	5,14	Ni Cr22 Mo9 Nb3.5 Fe

Formats disponibles (selon l'alliage) : feuillard, fil, barres et barres étirées.

Composition chimique (valeurs typiques)						Propriétés mécaniques à l'état recuit (valeurs typiques)		
	Mn	Cr	Mo	Ni	Autres	R _m	R _{p0.2}	A%
	1,40	18,20		8,05		630	310	54
	1,30	18,20		10,10		580	250	54
	1,30	18,50		12,60		570	250	52
	1,10	17,15		9,10	Ti = 0,30	620	290	52
	—	18,00	0,50	9,50	N = 0,065	630	330	50
	1,20	18,20	2,10	10,10		610	300	52
	1,35	17,30	2,60	12,70		590	290	49
	1,20	16,80	2,10	10,70	Ti = 0,350	600	290	50
	1,40	20,00	4,30	24,20	Cu = 1,40	610	295	41
	1,35	19,30		11,40		640	310	52
	0,60	21,00		11,00	N = 0,18 – Ce > 0,03	750	410	48
	1,30	25,00		19,2		610	290	42
	5,20	21,90	0,20	1,60	N = 0,21	740	550	32
	1,30	23,00	0,30	2,50	N = 0,21	750	560	32
	1,80	22,80	3,10	5,50	N = 0,17	830	620	29
	1,50	23,00	0,30	4,90	Cu = 0,40 – N = 0,10	740	550	30
	—	25,80	3,50	6,70	N = 0,26	910	680	30
	0,30	17,80			Ti + Nb = 0,65	490	320	30
	0,30	19,00	1,90		N = 0,015 - Nb = 0,60	540	360	30
	0,25	20,20			Nb = 0,45 - Cu = 0,45	490	340	31
	0,50	22,00			Ti, Nb, REE	490	330	30

**Pour plus d'informations,
contactez-nous :**

stainless@aperam.com | nickel.alloys@aperam.com

www.aperam.com



aperam
made for life