

Livre blanc

Le rôle des systèmes de tuyauterie en polymère dans le refroidissement liquide direct

Charles Freda, CEM, DCEP

Responsable mondial des data centers

Eveliina Juntunen, Dr sc. (techniques)

Spécialiste en gestion thermique



Résumé

L'augmentation exponentielle des besoins en traitement de données a poussé les systèmes de refroidissement par air traditionnels à leurs limites, favorisant l'adoption du refroidissement liquide direct (DLC) comme solution de gestion thermique supérieure pour les data centers modernes. Tirant parti de la capacité thermique élevée des liquides – environ 3 500 fois supérieure à celle de l'air – le DLC permet une évacuation efficace de la chaleur des charges informatiques à haute densité, tout en réduisant la consommation d'eau et en soutenant les initiatives de récupération de chaleur résiduelle. Cette fiche technique explore le rôle crucial des systèmes de tuyauterie en polymère pour garantir la fiabilité, l'efficacité et la durabilité des infrastructures DLC. Elle examine des facteurs de performance clés tels que la résistance à la corrosion, la robustesse mécanique et la stabilité hydraulique, soulignant comment les polymères avancés, comme le polypropylène à nucléation bêta, surpassent les métaux en termes de compatibilité chimique, de pureté du liquide de refroidissement et de durabilité du cycle de vie. De plus, cet article aborde la technologie de soudage infrarouge comme pilier de connexions étanches et exemptes de contamination, et souligne les avantages environnementaux des systèmes polymères, notamment la réduction de l'empreinte carbone et la légèreté des constructions. En combinant des connaissances techniques et des stratégies de mise en œuvre pratiques, cet article démontre comment les solutions à base de polymères pérennisent les infrastructures de refroidissement, permettant ainsi aux data centers de répondre à l'augmentation des charges thermiques et aux objectifs de développement durable les plus stricts.

Table des matières

Résumé	2
Abréviations	4
1. Refroidissement par liquide : une solution efficace face à l'augmentation des charges thermiques	5
2. Types de refroidissement par liquide	6
3. Optimisation du refroidissement durable grâce à une alimentation en liquide fiable dans le refroidissement liquide direct (DLC)	8
3.1 Matériaux de tuyauterie dans les data centers	8
3.2 Utilisation accrue de l'eau pure comme liquide de refroidissement	8
3.3 Amélioration de la pureté et de la qualité du liquide de refroidissement pour prévenir l'encrassement des plaques froides	9
3.4 Surface extérieure très lisse	9
4. Polypropylène : un matériau de tuyauterie adapté aux applications industrielles critiques	11
4.1 Résistance chimique supérieure	11
4.2 Robustesse mécanique et stabilité dimensionnelle	11
4.3 Résistance au chlore, au cuivre et au sel dans les environnements DLC	12
5. Soudage de précision : la clé de systèmes fiables et étanches	13
5.1 Soudage infrarouge rapide et propre	13
5.2 Résistance et fiabilité exceptionnelles des soudures	13
6. Importance croissante accordée au développement durable	15
6.1 Réduction de l'empreinte carbone et des déchets	15
6.2 Conception légère pour une logistique et une construction efficaces	15
6.3 Performance thermique au service de l'efficacité énergétique	16
7. De la théorie à la pratique	17
7.1 Solutions haute performance pour un débit optimal	17
7.2 Qualité et fiabilité sans compromis	17
7.3 Plus de 35 ans d'expertise éprouvée dans les environnements critiques	17
7.4 Technologie de soudage de pointe	17
7.5 Préfabrication	17
7.6 Une conception experte	18
8. Conclusion – Pérennisez votre infrastructure de refroidissement	19
Références	20

Abréviations

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society of Testing and Materials
AWS	American Welding Society
BPE	Équipement de bioprocédés
BSRIA	Building Services Research and Intelligence Association
CDU	Unité de distribution de liquide de refroidissement
CFD	Dynamique numérique des fluides
CO ₂	Dioxyde de carbone
CPU	Unité centrale de traitement
D2C	Refroidissement direct sur puce
Eau DI	Eau déionisée
DLC	Refroidissement liquide direct
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
EN	Norme européenne
EPD	Déclaration environnementale du produit
FWS	Système d'eau de l'établissement
GPU	Unité de traitement graphique
HDPE	Polyéthylène haute densité
IR	Infrarouge
NDT	Essais non destructifs
PG	Propylène glycol
PP-H	Homopolymère de polypropylène
PP-R	Copolymère aléatoire de polypropylène
PP-RCT	Copolymère aléatoire de polypropylène à cristallinité et résistance thermique modifiées
PVC	Chlorure de polyvinyle
PVDF	Fluorure de polyvinylidène
SCG	Propagation lente des fissures
SCH	Calibre des tuyaux
SDR	Rapport dimensionnel standard
SFN	Réseau de fluide secondaire
SS	Acier inoxydable
QC7	Vanne à raccord rapide 700
TCS	Système de refroidissement technologique
WBI	Inspection du bourrelet de soudure
WHR	Récupération de chaleur résiduelle

1. Refroidissement liquide : une solution efficace face à l'augmentation des charges thermiques

La croissance exponentielle des besoins en traitement de données a engendré d'importants défis en matière de gestion thermique pour les data centers modernes. Les méthodes de refroidissement par air traditionnelles sont de plus en plus mises à rude épreuve par les fortes densités de chaleur générées par le matériel informatique actuel. Ceci a suscité un intérêt croissant pour les solutions de refroidissement alternatives, notamment le refroidissement liquide direct.

Le refroidissement liquide n'est pas un concept nouveau : les supercalculateurs y ont recours depuis des décennies pour gérer leurs charges thermiques extrêmes. Les méthodes de refroidissement liquide offrent d'excellentes performances et une grande efficacité énergétique grâce aux propriétés supérieures du liquide comme fluide caloporteur. Avec une capacité thermique volumique environ 3 500 fois supérieure à celle de l'air, le liquide excelle dans le transfert efficace de la chaleur. Un tableau comparatif est présenté au Tableau 1. Concrètement, cela signifie que les systèmes de refroidissement par air actuels peuvent dissiper la chaleur des déploiements informatiques jusqu'à 90 kW/rack (avec une efficacité décroissante), tandis que les solutions de refroidissement liquide peuvent prendre en charge de manière fiable et efficace des densités de racks bien supérieures à 100 kW¹.

Dans les systèmes refroidis par air, la température de refroidissement est relativement basse (environ 20 °C), et le refroidissement par évaporation est une méthode courante pour rejeter la chaleur dans l'environnement². Cependant, le refroidissement par évaporation contribue fortement à la consommation d'eau des data centers et est donc aujourd'hui déconseillé.

Les systèmes refroidis par liquide utilisent généralement des liquides de refroidissement relativement chauds (environ 45 °C), comparés aux systèmes refroidis par air, ce qui réduit considérablement, voire élimine, le besoin de refroidissement par évaporation². Le refroidissement liquide permet ainsi de réduire considérablement la consommation d'eau de l'installation et d'alléger la pression sur les ressources en eau souterraine régionales.

De plus, les systèmes de refroidissement liquide offrent la possibilité de réutiliser l'énergie thermique récupérée des équipements informatiques. Associée à des pompes à chaleur ou à de simples échangeurs de chaleur, cette énergie peut être utilisée dans les réseaux de chauffage urbain ou valorisée à des fins industrielles, un sujet de plus en plus pertinent à mesure que les data centers s'efforcent d'atteindre des objectifs ambitieux en matière de durabilité et d'efficacité énergétique. En Europe, par exemple, un ensemble de directives et de réglementations nationales encouragent ou imposent déjà la récupération de la chaleur afin de réduire le gaspillage d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 1 : Propriétés thermiques des liquides de refroidissement courants

Caractéristiques (20 °C, 101,3 MPa / 14 692,3 PSI)	Air ³	Eau ⁴	25 % de propylène glycol (PG25) ⁵
Conductivité thermique [W/(m·K)]	0,025	0,598	0,478
Densité [kg/m³]	1,2	998	1024
Capacité thermique massique [kJ/(kg·K)]	1,01	4,18	3,98
Capacité thermique par unité de volume [kJ/m³·K]	1,2	4176	4075
Viscosité dynamique [cP]	0,0182	1,00	2,86

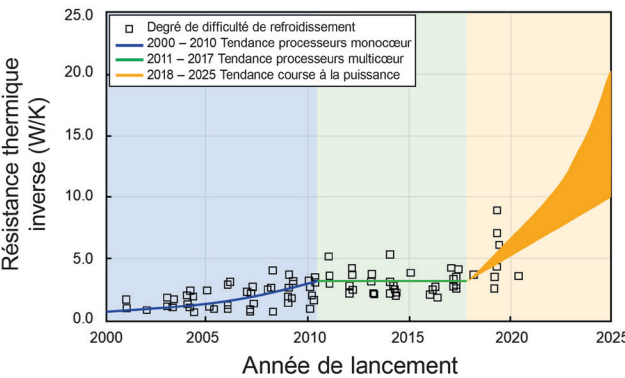


Figure 1 : Augmentation de la difficulté de refroidissement des charges informatiques des data centers⁶

1. Green Revolution Cooling [GRC], 2024
2. Schneider Electric [SE], 2025
3. Zieliński et al., 2020
4. National Institute of Standards and Technology, sans date
5. Castrol ON, 2025
6. ASHRAE Technical Committee 9.9, 2021

2. Types de refroidissement par liquide

L'expression « refroidissement par liquide » ou « refroidissement liquide » englobe deux grandes catégories : le refroidissement liquide direct et le refroidissement par immersion. Alors que le refroidissement liquide direct achemine le liquide de refroidissement précisément vers les composants les plus chauds grâce à des plaques froides, le refroidissement par immersion adopte une approche plus globale, en immergeant totalement les composants du serveur dans un liquide de refroidissement non conducteur.

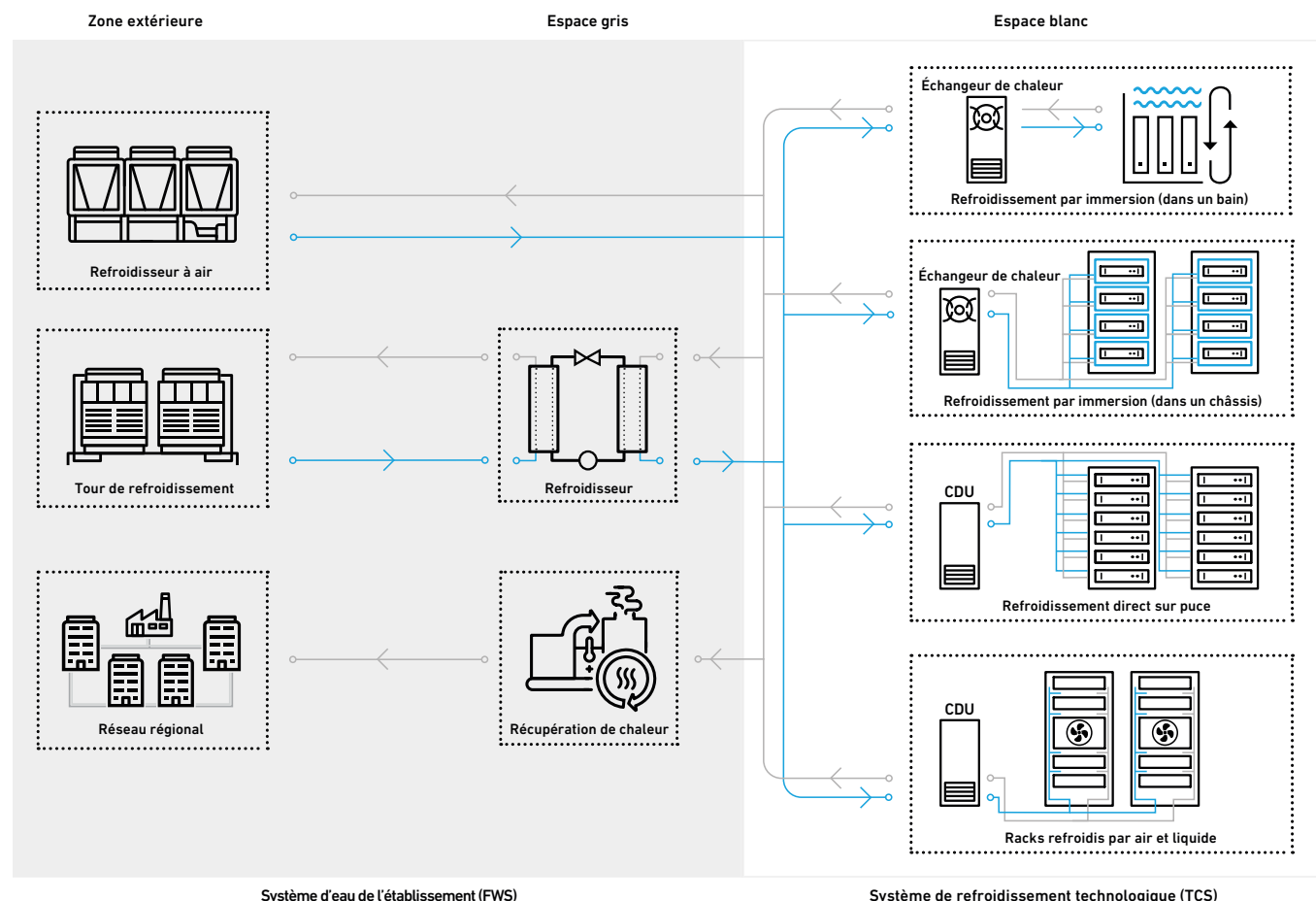


Figure 2 : Vue simplifiée des systèmes de refroidissement liquide dans les data centers, d'après la définition de l'ASHRAE.⁷

Refroidissement liquide direct

Parmi les deux types, le refroidissement liquide direct (DLC), parfois appelé refroidissement direct sur puce (D2C) ou refroidissement par plaque froide, est le plus couramment utilisé par les entreprises et les opérateurs à grande échelle (hyperscale).

La chaleur générée par les composants critiques, tels que les processeurs (CPU) et les cartes graphiques (GPU), est transférée au liquide de refroidissement via une plaque froide spécialement conçue. Cette chaleur est ensuite acheminée par le système de tuyauterie jusqu'à une unité de distribution de liquide de refroidissement (CDU), point de démarcation entre le système de refroidissement technologique (TCS), parfois appelé réseau de fluides secondaire (SFN), et le système d'eau de l'établissement (FWS).

Les CDU sont des équipements mécaniques intégrés ou montés sur châssis, contenant des pompes, un échangeur de

chaleur, des commandes et des composants hydroniques. Ces équipements gèrent la température des puces en régulant le débit et en échangeant de la chaleur avec le FWS, régulant ainsi la température du liquide de refroidissement. De plus, les CDU maintiennent la pureté et la qualité du fluide grâce à des filtres et des capteurs intégrés, et en isolant le TCS en circuit fermé.

Le FWS rejette la chaleur dans l'environnement ou vers un système de récupération de chaleur. Le liquide refroidi est ensuite acheminé vers la CDU.

Étant la seule interface en contact direct avec la source de chaleur, à savoir la puce, les performances optimales de la plaque froide sont primordiales pour l'efficacité et la longévité de l'ensemble du système⁸. Les plaques froides comportent de minuscules microcanaux conçus pour optimiser le transfert

7. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning [ASHRAE], 2019

de chaleur. Des particules fines ou d'autres impuretés peuvent facilement obstruer ces canaux. Pour éviter l'encrassement des plaques froides, il est crucial de maintenir une pureté et une qualité élevées du liquide et d'empêcher toute prolifération biologique. C'est pourquoi des solutions aqueuses de propylène glycol (PG) enrichies d'additifs spécifiques, tels que des inhibiteurs de corrosion et de croissance organique, sont couramment utilisées⁸. De plus, les systèmes sont équipés de filtres fins.

Généralement, les systèmes de refroidissement liquide sont monophasiques : le liquide de refroidissement reste liquide tout au long du circuit. Cependant, dans certains cas, des systèmes diphasiques sont utilisés. Ces liquides de refroidissement ont un point d'ébullition bas, ce qui leur permet de s'évaporer lors du refroidissement de la puce, puis de se condenser à nouveau pour évacuer la chaleur au niveau d'un condenseur externe².

Comparés aux systèmes de refroidissement par air traditionnels, les systèmes DLC offrent des performances thermiques et énergétiques supérieures¹. Toutefois, le DLC ne refroidit que les composants critiques, tels que les processeurs et les GPU des serveurs, responsables d'environ 70 à 80 % de la charge thermique totale de l'espace libre¹. Les autres composants nécessitent toujours un refroidissement par air traditionnel, faisant de l'écosystème un système de refroidissement hybride. Cependant, comme la majeure partie de la chaleur est évacuée par le DLC, le besoin de refroidissement par air est considérablement réduit, ce qui entraîne une diminution de la consommation d'énergie et du bruit des ventilateurs².

L'un des avantages pratiques du DLC par rapport aux autres types de refroidissement liquide est sa ressemblance générale avec les autres systèmes de refroidissement courants. Les exploitants de data centers constatent que leurs anciens systèmes de refroidissement par air ne répondent plus aux exigences des équipements informatiques de leurs locataires et clients internes. Le refroidissement DLC propose une solution efficace, fiable et évolutive pour relever ces défis de modernisation ou d'extension.

Refroidissement direct sur puce (D2C) est la forme de refroidissement liquide la plus répandue dans les data centers aujourd'hui, permettant d'évacuer efficacement la chaleur directement des CPU et des GPU grâce à des plaques froides et une tuyauterie en circuit fermé, tout en assurant une intégration simple et évolutive avec l'infrastructure de refroidissement par air existante.

Refroidissement par immersion

Pour les nouveaux data centers haute densité, le refroidissement par immersion offre le potentiel de performance le plus élevé. Comme le DLC, il peut être conçu comme un système monophasé ou biphasé. Cependant, dans ce cas, les serveurs sont immergés dans un fluide diélectrique qui entre en contact direct avec tous les composants émetteurs de chaleur, offrant deux avantages clés : une connexion thermique optimale sans couches intermédiaires et la suppression du refroidissement par air supplémentaire. Le système fonctionne également de manière quasi silencieuse, puisqu'il est dépourvu de ventilateurs.

Ces caractéristiques confèrent au refroidissement par immersion un avantage certain en termes de performances par rapport au refroidissement liquide direct (DLC), en éliminant plus de 95 % de la chaleur grâce au liquide². Malgré son potentiel, son adoption reste limitée en raison de problèmes de mise à l'échelle et de la nécessité de nouvelles procédures et de nouveaux équipements, que les responsables de data centers adoptent avec prudence^{1,2}.

Le refroidissement par immersion consiste à immerger complètement les serveurs dans un liquide non conducteur, ce qui permet d'obtenir des performances de refroidissement optimales en éliminant les interfaces thermiques et le besoin de refroidissement par air. Son adoption à plus grande échelle est toutefois aujourd'hui freinée par des difficultés de mise à l'échelle ainsi que par la nécessité de nouvelles procédures et de nouveaux équipements.

1. Green Revolution Cooling [GRC], 2024

2. Schneider Electric [SE], 2025

8. Chinthaparthi L.S.R., 2024

3. Optimisation du refroidissement durable grâce à une circulation fiable du fluide dans le refroidissement liquide direct (DLC)

L'augmentation des densités de chaleur et l'impératif d'une meilleure efficacité énergétique favorisent l'adoption croissante du refroidissement liquide direct. À mesure que le secteur évolue, l'infrastructure de circulation des liquides joue un rôle crucial dans le succès à long terme de ces systèmes de refroidissement critiques, en garantissant performance et fiabilité pour l'ensemble de la fonction de refroidissement.

3.1 Matériaux de tuyauterie dans les data centers

Bien que le refroidissement liquide direct commence tout juste à se généraliser, la circulation des liquides n'est pas une nouveauté dans les data centers. Depuis des décennies, les systèmes d'eau des établissements (FWS) font partie intégrante des data centers, incluant divers processus liés aux liquides tels que l'eau glacée, l'eau de condensation, l'eau d'évaporation, l'eau sanitaire, le traitement chimique, l'eau de procédé, ainsi que le réchauffage et la récupération de chaleur. De ce fait, différentes générations de matériaux de tuyauterie se sont imposées dans les data centers. L'industrie est passée des canalisations en acier non allié et en cuivre aux canalisations actuelles en acier inoxydable⁹ et devrait connaître une adoption croissante des polymères à l'avenir.

Chaque transition a été principalement motivée par la recherche de performances accrues, d'une fiabilité renforcée ou d'une meilleure rentabilité. Par exemple, les aciers inoxydables de haute qualité SS304 et SS316, couramment installés aujourd'hui, ont remplacé le cuivre principalement en raison des problèmes de corrosion et de pureté du liquide dans les boucles TCS.

La prédominance de l'acier s'explique historiquement par sa familiarité avec le secteur, sa grande disponibilité et ses avantages par rapport aux polymères dans les applications à pression et température extrêmes. Cependant, dans les systèmes DLC, les conditions de fonctionnement se situent dans les limites des paramètres des polymères⁹, et la résistance supérieure s'accompagne d'un poids élevé, ainsi que des temps de montage et de rinçage plus longs.

De plus, l'évolution du secteur vers l'optimisation des performances grâce à de nouveaux liquides de refroidissement et à des plaques froides de plus en plus miniaturisées — aboutissant à des structures microfluidiques directement sur la puce¹⁰ — exige une pureté accrue du liquide de refroidissement et une compatibilité chimique étendue. Dans ces deux domaines, les polymères haute performance surpassent l'acier.

Les polymères haute performance sont des matériaux avancés conçus pour répondre aux exigences mécaniques, chimiques et thermiques des secteurs exigeants et stratégiques, tels que la fabrication de semi-conducteurs ou les data centers. Parmi les polymères couramment utilisés dans les systèmes de tuyauterie industrielle, on trouve le PVC (polychlorure de vinyle), également appelé vinyle, le PEHD (polyéthylène haute densité), le PP (polypropylène) et le PVDF (fluorure de polyvinylidène). En tant que solution avancée, les propriétés détaillées du produit varient selon le fabricant.

Un avantage fondamental de la tuyauterie en polymère est sa résistance intrinsèque à la corrosion, contrairement aux matériaux métalliques, sensibles à de nombreux types de corrosion. Dans les systèmes de refroidissement des data centers, l'utilisation de liquides de refroidissement enrichis en additifs anticorrosion a résolu ce problème. Cependant, cela complexifie le système de surveillance et de dosage du fluide, d'où l'intérêt croissant pour les solutions sans corrosion.

3.2 Utilisation accrue de l'eau pure comme liquide de refroidissement

La recherche de performances optimisées et d'une efficacité accrue alimente le besoin de nouveaux liquides de refroidissement. Aujourd'hui, un mélange à 25 % de propylène glycol (PG25) et d'eau est couramment utilisé⁵. Outre les inhibiteurs de corrosion, ce mélange est enrichi d'additifs pour prévenir le gel pendant le transport et l'installation, ainsi que la formation de mousse, les variations de pH et la prolifération bactérienne. En dessous d'une concentration de 25 % de glycol, des biocides sont également nécessaires.

L'ajout de glycols à l'eau entraîne une baisse des performances de refroidissement globales, car la conductivité thermique et la capacité thermique massique diminuent tandis que la densité et la viscosité augmentent¹¹.

5. Castrol ON, 2025

9. Mitchell, D. et al., 2024

10. Microsoft, 2024

11. Azarifar M. et al, 2024

12. The Electrochemical Society, sans date

Un tableau comparatif est présenté au Tableau 1.

Cela signifie qu'un système DLC utilisant de l'eau, et en particulier de l'eau déionisée (DI), peut évacuer la chaleur plus efficacement, permettant potentiellement des densités de serveurs plus élevées et des débits de pompage réduits. Par exemple, dans une boucle DLC de 70 m de long avec un tuyau de diamètre 160 mm et un ΔT de 10 °C, la perte de charge relative avec de l'eau déionisée est d'environ 13 % inférieure à celle constatée avec du PG25, en raison de sa plus faible viscosité, ce qui contribue à une réduction de la puissance de pompage d'environ 16 %.

L'eau déionisée étant dépourvue de minéraux dissous, elle est très corrosive. Lorsque les métaux se corrodent, ils réagissent avec les éléments de leur environnement (comme l'oxygène et l'eau) pour former de nouveaux composés chimiques. Bien que le métal lui-même soit perdu dans le liquide en circulation, il est transformé en produits de corrosion plus gros, solides et adhésifs qui s'accumulent sur les parois internes du conduit¹². Ceci entraîne une dégradation du matériau et une contamination du liquide au fil du temps. En revanche, les systèmes de tuyauterie en polymères (même capables de supporter une eau ultrapure beaucoup plus agressive) restent inertes au contact de l'eau déionisée ce qui augmente l'efficacité sans compromettre l'intégrité du système.

Un exemple de calcul de profondeur de corrosion et des particules libérées est présenté à la Figure 3. Des tuyaux d'un mètre en acier inoxydable SS304, SS316 et en polymères sont comparés sur une période de 10 ans dans de l'eau de puits J-13 (faible teneur en chlore, pH proche de la neutralité). Le taux de corrosion dans ces conditions varie entre 0,02 et 0,57 $\mu\text{m}/\text{an}$ ¹³. Des taux de corrosion plus élevés, de 0,87 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour l'acier inoxydable SS304 et de 0,77 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour l'acier inoxydable SS316, sont observés en atmosphère humide¹⁴. L'écart est considérable. Alors qu'une émission de particules de seulement 35 mm^3 sur dix ans est envisageable dans le meilleur des cas, elle peut atteindre 1 500 mm^3 sur dix ans, en supposant un taux de corrosion de 0,87 $\mu\text{m}/\text{an}$.

Profondeur de corrosion en dix ans [μm]

Dimension du conduit : inox SCH10 / 2 po, diam. ext. : 60,3 mm, épaisseur paroi : 2,77 mm

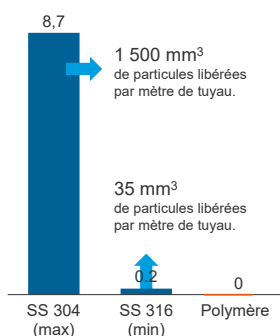


Figure 3 : Un exemple de calcul portant sur 10 ans d'utilisation de canalisations en milieu aqueux, utilisant les taux de corrosion maximaux et minimaux issus des recherches publiées.

3.3 Amélioration de la pureté et de la qualité du liquide de refroidissement pour prévenir l'encrassement des plaques froides

Afin d'améliorer la pureté du liquide de refroidissement et de maintenir les performances des plaques froides, les exigences de filtration des systèmes DLC évoluent rapidement. Une tendance similaire à l'augmentation des exigences de pureté a déjà été observée dans la fabrication de semi-conducteurs. La norme actuelle de filtration des particules de 25 à 50 μm ⁹ devrait prochainement être abaissée à 10 μm .

Cependant, cette exigence est loin des normes utilisées dans la fabrication de semi-conducteurs. Actuellement, la norme en vigueur pour les applications d'eau ultrapure dans le traitement des semi-conducteurs, la SEMI F63, exige une taille critique de particules inférieure à 5 nanomètres (0,005 μm), soit 20 fois plus petite que les exigences les plus strictes des systèmes DLC actuels. Cette exigence ne peut être satisfaite qu'à l'aide de polymères haute performance.

La filtration entraîne une perte de charge importante dans les systèmes DLC, mais elle est nécessaire pour éliminer les particules libérées avant qu'elles ne s'accumulent et n'endommagent les équipements et composants sensibles, tels que les pompes, les vannes et, surtout, les plaques froides (Figure xy). Cependant, la plaque froide étant située à mi-chemin du circuit DLC, il y a 50 % de chances que les contaminants provenant de la tuyauterie atteignent d'abord la plaque froide et ses microcanaux avant d'être extraits du liquide par filtration.

La tuyauterie en polymères, capable de répondre aux normes strictes des systèmes d'eau ultrapure, permet de réduire considérablement les risques d'obstruction et d'encrassement, tout en limitant le besoin d'une filtration micronique complexe et fréquente. En définitive, cela minimise les pertes de charge, réduit les besoins de maintenance et les coûts, tout en garantissant un fonctionnement constant.

3.4 Surface extérieure lisse

Un autre avantage fondamental de la tuyauterie en polymères par rapport aux métaux réside dans sa surface exceptionnellement lisse, due à sa fabrication et à l'absence de corrosion, comme mentionné précédemment.

12. The Electrochemical Society, sans date

Performances hydrauliques soutenues

La corrosion et l'entartrage engendrent au fil du temps une rugosité interne dans les canalisations métalliques, ce qui augmente les pertes de charge et réduit le diamètre interne. Comme le débit volumique laminaire, Q, est proportionnel à la quatrième puissance du diamètre ($Q \propto D^4$), même de faibles variations de diamètre influent significativement sur l'écoulement. Par conséquent, la maîtrise de la corrosion dans les canalisations métalliques est essentielle. Les canalisations en polymères, quant à elles, ne se corrodent pas, ce qui garantit des caractéristiques d'écoulement prévisibles et évite de surdimensionner le système de canalisations pour compenser une éventuelle dégradation interne.

La Figure 4 présente un exemple de calcul d'écoulement turbulent dans une conduite en acier inoxydable de 1 m de longueur et de diamètre nominal DN50. On suppose que la rugosité de surface augmente de $k = 0,015 \text{ mm}$ à $0,03 \text{ mm}$ et que la couche de produits de corrosion (incluant les zones occluses, le biofilm et les dépôts) s'accumule sur la surface de la conduite jusqu'à une épaisseur totale de $0,5 \text{ mm}$ sur une période de 10 ans, avec une eau utilisée à 20°C . Il en résulte une diminution de 4 % de la section d'écoulement et une réduction de 8 % du débit volumique sur une période de dix ans.

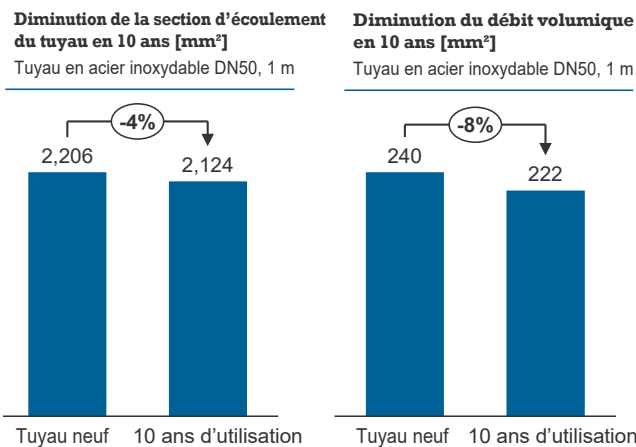


Figure 4 : Un exemple de calcul d'écoulement turbulent dans un tuyau en acier inoxydable DN50 de 1 m, en supposant que la rugosité de surface augmente de $k = 0,015 \text{ mm}$ à $0,03 \text{ mm}$ et que la couche de produits de corrosion s'accumule sur la surface du tuyau pour atteindre $0,5 \text{ mm}$ au bout de 10 ans.

9. Mitchell, D. et al., 2024
13. He, Ahn and Sippel, 2012
14. Ul-Hamid et al., 2017

Inhibition de la formation de biofilm

La rugosité de surface typique des tuyauteries en polymères est de $0,007 \mu\text{m}$, contre $0,1$ à $15 \mu\text{m}$ pour les tuyaux en acier, selon la qualité et le traitement de surface¹⁵. L'obtention d'une surface très lisse pour les tuyauteries métalliques est possible grâce à une étape supplémentaire d'électropolissage. Cependant, cela augmente les dépenses d'investissement initiales et prolonge la phase de mise en service du système DLC.

La qualité de la surface influe non seulement sur le frottement à l'écoulement, mais aussi sur l'adhérence et la croissance du biofilm^{16,17}. L'accumulation de biofilm peut restreindre l'écoulement, réduire l'efficacité du transfert thermique et nécessiter l'utilisation d'additifs chimiques agressifs pour le contrôler. De plus, les produits chimiques utilisés pour traiter le biofilm peuvent être corrosifs et endommager les composants sensibles du système de tuyauterie, tels que les plaques froides. En minimisant la formation de biofilm, les tuyauteries en polymères réduisent la dépendance à ces additifs, ce qui permet de réaliser des économies potentielles et de réduire l'impact environnemental. La croissance du biofilm sur différents matériaux de tuyauterie est illustrée à la Figure 5.

Croissance du biofilm sur différents matériaux de tuyauterie pour data centers
Test de biofilm dans un système d'eau pure stagnante

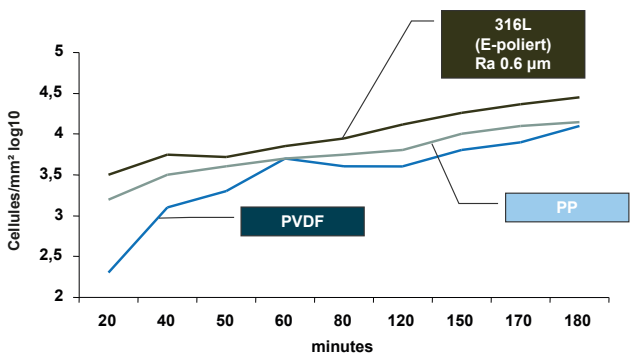


Figure 5 : Test de biofilm dans un système d'eau pure stagnante.

Dans les systèmes de refroidissement liquide direct, la tuyauterie joue un rôle crucial pour garantir l'efficacité du système. Face à l'augmentation des densités de chaleur et aux préoccupations croissantes concernant la consommation d'énergie, l'optimisation de l'écoulement et des transferts thermiques est essentielle.

Le choix initial du liquide de refroidissement, la préservation de ses performances et le maintien d'une surface de tuyauterie lisse sont essentiels pour parvenir à une gestion thermique fiable et efficace.

15. The engineering toolbox, sans date
16. Hyde, F.W., Alberg, M. and Smith, K., 1997
17. Gillis and Gillis, 1996

4. Polypropylène : un matériau de tuyauterie adapté aux applications industrielles critiques

Le polypropylène est un polymère très polyvalent et largement utilisé dans diverses applications industrielles et grand public. Son excellent rapport qualité-prix, sa résistance chimique et sa robustesse mécanique, même à haute température, en font une technologie clé, notamment pour le DLC.

4.1 Résistance chimique supérieure

Le polypropylène est un polymère semi-cristallin dont la phase cristalline peut présenter différentes modifications, selon que le matériau soit nucléé ou non. Le type et la quantité de la phase cristalline influencent considérablement ses propriétés chimiques et mécaniques.

Une forme particulière, l'homopolymère de polypropylène à nucléation bêta (PP-H bêta), offre une résistance chimique supérieure et une durabilité accrue par rapport au polypropylène standard et aux alternatives métalliques. La modification bêta augmente significativement la ténacité par rapport au matériau standard (alpha) grâce à la morphologie supérieure illustrée à la Figure 6. La modification bêta est obtenue par l'ajout d'agents de nucléation spécifiques. Un traitement spécifique permet d'obtenir une structure homogène et fine, minimisant les contraintes internes et améliorant ainsi les performances globales.

De plus, le PP-H bêta offre une résistance chimique accrue, particulièrement pertinente pour les systèmes DLC qui utilisent divers liquides de refroidissement contenant un large éventail d'additifs afin d'optimiser leurs performances. Le PP-H bêta a été testé pour résister à une exposition prolongée à des produits chimiques agressifs à haute température, une résistance éprouvée par 30 ans d'utilisation sur le terrain¹⁸.

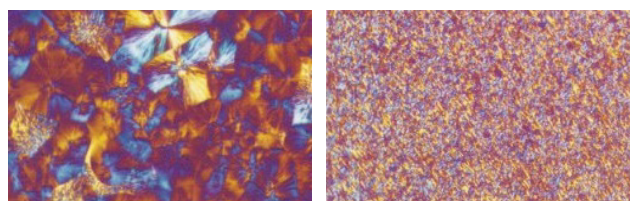


Figure 6. Structure du PP-H non nucléé (à gauche) et du PP-H bêta nucléé (à droite) (grossissement = 80x ; lumière transmise, polarisée ; coupe microtomique de 15 µm)

4.2 Robustesse mécanique et stabilité dimensionnelle

L'érosion peut également se produire dans les data centers refroidis par liquide, au niveau des zones où la vitesse d'écoulement est élevée et où le fluide change de direction, comme à la sortie des CDU. Une conception hydraulique optimisée constitue la base pour prévenir l'érosion en réduisant les

accélération locales, les phénomènes d'impact et les perturbations inutiles de l'écoulement. Associée à des simulations CFD, elle permet d'identifier les zones potentiellement sujettes à l'érosion et de mettre en place les mesures correctives appropriées.

Une excellente résistance mécanique est essentielle pour la construction et l'exploitation des data centers, où les systèmes de tuyauterie peuvent être soumis à des vibrations, des cycles thermiques, des chocs accidentels et des risques de contraintes sismiques. Contrairement aux métaux dont l'extrême résistance se fait au détriment du poids, les polymères haute performance offrent un équilibre optimal entre résistance et légèreté.

La résistance mécanique du PP-H bêta est comparée à celui du polypropylène random copolymère (PP-R), qui présente un degré de cristallinité inférieur (Figure 7). Une cristallinité plus élevée confère une résistance et une rigidité supérieures, qui se traduit par une meilleure résistance aux chocs, notamment aux accidentels. De plus, la rigidité du PP-H bêta permet la mise en place de systèmes de tuyauterie complets, alors que le PP-R est un matériau trop flexible pour des composants sous pression tels que les vannes. La rigidité supérieure du PP-H bêta permet d'espacer davantage les supports, car ce matériau rigide ne plie pas et ne s'affaisse pas.

Le polypropylène random copolymère à cristallinité et résistance à la température modifiées (PP-RCT), non pris en compte dans cette comparaison, est un dérivé du PP-R à nucléation bêta. Il présente une meilleure résistance à long terme à la pression à des températures élevées. À court terme, les propriétés mécaniques du PP-RCT sont similaires à celles du PP-R. En termes de résistance chimique, le PP-RCT est supérieur au PP-R, mais n'atteint pas le niveau du PP-H.

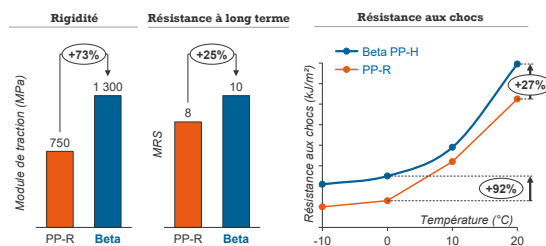


Figure 7 : Comparaison des propriétés mécaniques des polypropylènes selon la norme ISO 15494. La résistance aux chocs a été mesurée par essai de résilience Charpy, avec des échantillons de laboratoire à des fins de comparaison. La fiche technique du PP-H bêta indique 50kJ/m² et celle du PP-R 20kJ/m² à 20 °C.

18. Georg Fischer, 2003

4.3 Résistance au chlore, au cuivre et aux sels dans les environnements DLC

La présence de chlore et de sels tels que les chlorures et les sulfates a causé de sérieux problèmes avec les canalisations en polymères dans les applications municipales¹⁹. Ces préoccupations ont également été soulevées dans les applications de data centers, car ces substances peuvent être présentes dans les liquides de refroidissement DLC^{7,20}, mais elles sont infondées.

Le chlore, un oxydant puissant, attaque chimiquement les canalisations (oxydation), ce qui rend leur surface rugueuse. Cette rugosité peut entraîner une propagation lente des fissures (SCG). La présence de particules et d'ions de cuivre accélère ce processus, le cuivre agissant comme catalyseur.

Le chlore ne présente pas de risque pour les matériaux PP-H bêta dans les systèmes DLC où des niveaux de chlore élevés et prolongés sont inattendus. Contrairement aux réseaux d'eau potable municipaux, où l'eau est destinée à la consommation humaine, les systèmes DLC ne nécessitent pas de désinfection pour éliminer bactéries et virus. Par conséquent, les niveaux de chlore ne sont pas maintenus et tout chlore libre se dissipe rapidement. De plus, comme indiqué dans l'outil de résistance chimique de GF²¹, le système DLC de GF est parfaitement adapté à une exposition continue à des concentrations de chlore allant jusqu'à 2 ppm à des températures allant jusqu'à 60 °C, avec une durée de vie prévue de 25 ans.

À l'exception de la plaque froide, les systèmes DLC utilisent peu de composants contenant du cuivre, contrairement aux installations de plomberie où les conduites et raccords en laiton sont fréquemment utilisés. Par conséquent, le lessivage du cuivre devrait être faible et, si l'on se base sur une vaste expérience dans l'industrie, n'est pas considéré comme critique pour le matériau du système DLC de GF, à condition d'éviter les scénarios de risque suivants :

- Présence de cuivre élémentaire ou d'alliages de cuivre en contact physique direct avec la tuyauterie GF (par exemple, dans les raccords de transition en laiton) et que le fluide contient également du cuivre ou d'autres ions de métaux de transition, créant un environnement d'oxydoréduction. Ce scénario de risque peut être atténué en évitant les connexions directes avec des pièces en cuivre élémentaire.

- L'eau est régulièrement oxygénée (comme dans un circuit de recirculation d'eau chaude dans les bâtiments). En présence d'ions métalliques mixtes, cela crée un environnement d'oxydoréduction. Cependant, ce scénario est considéré comme improbable lors de l'utilisation de DLC.
- Le chlore libre et les ions cuivre sont présents simultanément pendant des périodes prolongées, notamment à des températures élevées et à des pH inférieurs à 7. Comme indiqué précédemment, ce scénario est également peu probable lors de l'utilisation de DLC en raison de la dissolution rapide du chlore.

Avec les progrès de l'informatique basée sur l'IA, le choix des matériaux pour la tuyauterie revêt une importance croissante. Les polymères haute performance, tels que le polypropylène, se sont imposés comme une solution de choix grâce à leurs effets bénéfiques sur la pureté du liquide de refroidissement, leurs propriétés chimiques et mécaniques intrinsèques avantageuses et leur rapport coût-efficacité.

7. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning [ASHRAE], 2019

19. Replumb Specialties Inc., 2024

20. IBM, 2025

21. GF Piping Systems, sans date

5. Soudage de précision : la clé de systèmes fiables et étanches

Le principal risque de fuite dans un système de tuyauterie réside dans les raccords. La fusion infrarouge est la technologie de soudage la plus fiable, spécialement conçue pour les environnements critiques.

5.1 Soudage infrarouge rapide et propre

L'intégrité d'un système de tuyauterie dépend fortement de la fiabilité de ses soudures. Pour répondre aux exigences élevées des systèmes DLC, des raccords propres, homogènes et extrêmement fiables sont nécessaires, ce qui n'est possible qu'avec le soudage infrarouge (IR). Le soudage IR est une méthode d'assemblage sans contact qui utilise le rayonnement infrarouge pour contrôler précisément la température et créer une liaison moléculaire, comme illustré à la Figure 8. L'absence de contact direct, de gaz de soudage ou de tout matériau d'apport élimine le risque de contamination, garantissant une fiabilité maximale des soudures et une pureté totale du circuit du liquide de refroidissement, car aucune contamination n'est libérée à l'intérieur de la boucle de tuyauterie pendant le processus de soudage infrarouge des polymères.

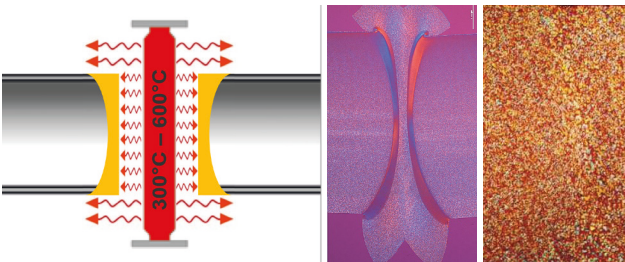


Figure 8 : La soudure par fusion infrarouge (à gauche) génère de faibles contraintes au niveau de la soudure (au centre) et garantit une cristallinité uniforme sur l'ensemble de l'assemblage (à droite). L'image montre la surface intérieure du tube en lumière polarisée transmise, avec un grossissement de 48x. La largeur de l'image correspond à la zone de soudure.

Les tuyauteries à soudures métalliques doivent être nettoyées et passivées avant leur mise en service, conformément aux recommandations de diverses normes telles que ASME B31.3, AWS D10.18 et ASTM A380/A967^{22,23}. Le nettoyage est nécessaire pour éliminer les résidus de soudure, et la passivation permet la formation et la régénération de la couche protectrice naturelle d'oxyde de chrome de l'acier inoxydable. Ce procédé impliquant des solutions acides et d'autres produits chimiques, un rinçage complet après passivation est indispensable⁹.

Les polymères étant non corrosifs, la passivation et le rinçage ultérieur peuvent être évités. De plus, le soudage IR ne génère aucune contamination du circuit de tuyauterie. Comme le souligne BSRIA, les tuyauteries en polymères « présentent moins de problèmes liés à la saleté que les tuyauteries en acier et en cuivre, car les méthodes d'assemblage sont généralement plus propres et il n'y a aucun risque de corrosion »²⁴.

Par conséquent, les besoins de rinçage, pouvant atteindre 8 semaines lors de la mise en service, peuvent être considérablement réduits.

5.2 Résistance et fiabilité exceptionnelles des soudures

En règle générale, une faible contrainte au niveau de la soudure est essentielle pour des soudures fiables, quel que soit le matériau de la tuyauterie. Les contraintes accélèrent la fissuration mécanique et la fragilité chimique.

Le soudage IR, en minimisant les contraintes internes et en assurant une cristallinité uniforme dans la soudure, réduit considérablement le risque de défaillance des soudures à long terme. Des études cristallographiques ont montré (Figures 8 et 9) que la phase de nucléation du polymère se reforme dans la zone de soudure après le procédé de soudage IR. Les propriétés du matériau au niveau de la soudure conservent jusqu'à 96 % de la résistance du matériau de base, selon les essais de traction réalisés conformément à la norme DVS 2203-5. Ce taux est largement supérieur au minimum requis de 60 % et témoigne d'une excellente qualité d'assemblage. Comme l'épaisseur de paroi augmente également au niveau de la zone soudée, cette zone est généralement plus résistante que le tube d'origine. En revanche, la zone soudée des tubes métalliques constitue une zone à risque en raison du traitement thermique et de la présence de particules.

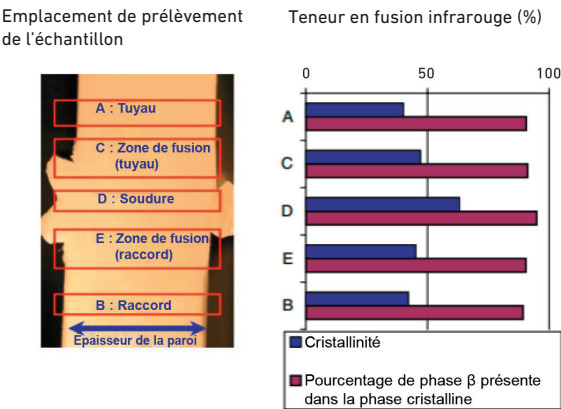


Figure 9 : Les propriétés du matériau dans la zone soudée par infrarouge (D) se rétablissent progressivement jusqu'à atteindre finalement celles du tube non soudé (A). Une cristallinité plus élevée améliore à la fois ses propriétés chimiques et mécaniques. Illustration de la zone de prélèvement à gauche et analyse de la structure du matériau (WAXS) dans chaque section à droite. Dimensions de l'échantillon : 10 × 10 × 1 mm, pour une soudure infrarouge de 110 × 10 mm sur du PP-H bêta.

9. Mitchell, D. et al., 2024
22. ASME, sans date. AWS, sans date
23. ASTM international, sans date
24. BSRIA, 2020

Le contrôle précis de la température et de la pression des machines de fusion infrarouge réduit les contraintes et permet d'obtenir des bourrelets de soudure fins, comme illustré à la Figure 10. Les bourrelets de soudure pouvant perturber l'écoulement et favoriser la prolifération de biofilms, leur finesse est généralement recherchée. L'aspect d'un bourrelet de soudure varie selon la technologie, le matériau et plusieurs autres facteurs essentiels, tels que le contrôle de la température, la précision d'alignement et les conditions environnementales. Ces facteurs sont tous cruciaux pour garantir des soudures homogènes et de haute qualité, indispensables aux applications critiques.

Le soudage IR permet d'obtenir des soudure dont la résistance atteint jusqu'à 96 % de celle du matériau de base. Cette technologie garantit des connexions propres et homogènes, sans risque de contamination et avec des besoins de rinçage minimaux lors de la mise en service. Une fiabilité inégalée est assurée par une automatisation complète et une traçabilité numérique exhaustive de chaque soudure.

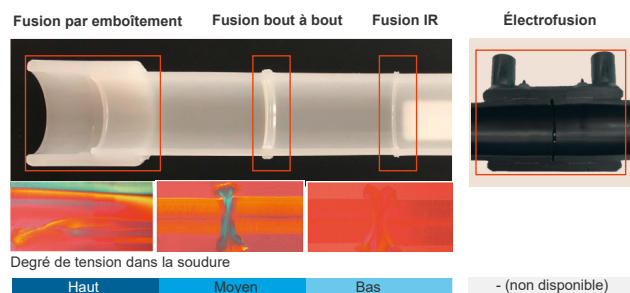


Figure 10 : Bourrelet de soudure obtenu avec différentes technologies de fusion de polymères.

L'automatisation et le contrôle garantissent la fiabilité

Avec plus de 500 machines de fusion haute performance utilisées dans 15 sites de préfabrication à travers le monde, GF réalise plus de 25 millions de soudures par an. Selon ces données, on constate en moyenne une seule défaillance pour 2,4 millions de soudures. Cette fiabilité remarquable est le fruit du haut degré d'automatisation des machines de soudage infrarouge de GF.

Les machines de soudage infrarouge automatisées surveillent et ajustent en temps réel les paramètres environnementaux (altitude, température ambiante) et de soudage (durée de chauffe, température du matériau, pression) afin de garantir l'intégrité de chaque soudure. Pour une traçabilité complète, chaque soudure et ses paramètres sont enregistrés sous un identifiant unique et peuvent être consultés ultérieurement. De plus, une inspection numérique de pointe, par exemple à l'aide d'un outil d'inspection des bourrelets de soudure (WBI) ou par contrôle non destructif par ultrasons (CND), peut être mise en œuvre si un contrôle de qualité supplémentaire s'avère nécessaire. Cela apporte une tranquillité d'esprit supplémentaire pour les applications critiques.

L'approche de gestion de la qualité totale de GF privilégie l'automatisation et l'inspection numérique pour une raison simple : Dans tous les secteurs et segments, les défaillances des soudures sont rarement liées à la technologie ; la grande majorité est due à des erreurs humaines et à une mauvaise manipulation des machines. Par conséquent, l'automatisation et le contrôle de qualité numérique du soudage sont indispensables pour les applications critiques telles que le DLC.

6. Importance croissante accordée au développement durable

À l'heure où la conscience environnementale s'accroît, la durabilité des infrastructures des data centers est primordiale. Les systèmes de tuyauterie en polymères offrent une proposition de valeur convaincante.

6.1 Réduction de l'empreinte carbone incorporée et des déchets

Globalement, la production de tuyauterie en polymères génère des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) nettement inférieures à celles de la fabrication, énergivore, de tuyauterie métallique. Cet écart est un facteur clé expliquant la réduction de l'empreinte carbone incorporée des systèmes en polymères par rapport aux métaux.

La Figure 11 présente un exemple comparant un système de tuyauterie en acier inoxydable (SCH10/EN 10357/ASME BPE 4 po) à un système en polymères (PP-H d160/SDR17.6) dans la conception de référence EcoStruxure 109 de Schneider Electric. Dans ce cas, le remplacement de l'acier inoxydable par un système en polymères réduit l'empreinte carbone globale de 51 %.

Les valeurs de CO₂ de cet exemple sont calculées pour la phase des matières premières (A1) du cycle de vie du produit à partir de la base de données ecoinvent et des déclarations environnementales de produit (DEP) lorsqu'elles sont disponibles. Une comparaison des émissions de carbone en exploitation devrait s'appuyer sur des données issues de l'exploitation réelle de data centers, qui ne sont pas disponibles pour cette conception de référence EcoStruxure 109.

Il convient de noter que les procédés de recyclage du plastique, encore peu développés, pourraient potentiellement réduire l'écart entre les polymères et les métaux sur l'ensemble de leur cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la fin de vie. Concernant les métaux, le recyclage

est plus répandu. Par ailleurs, la longue durée de vie des systèmes polymères de haute qualité, souvent supérieure à 25 ans, atténue ce problème. Réduire la fréquence de remplacement a un impact significatif sur la consommation de ressources, les émissions et la production de déchets associées. De ce fait, l'analyse complète de la durabilité est complexe et nécessite des recherches complémentaires.

6.2 Conception légère pour une logistique et une construction efficaces

La densité plus faible des polymères par rapport à l'acier inoxydable permet d'obtenir des systèmes nettement plus légers (Figure 11), offrant des avantages considérables tout au long du cycle de vie du projet. Par exemple, la conception de référence Schneider ²⁵ utilisée comme exemple est 64 % plus légère lorsqu'elle est construite avec des tuyauteries en polymères au lieu d'acier inoxydable.

De manière générale, des composants plus légers offrent divers avantages. D'une part, ces modules sont plus faciles à manipuler pour le personnel sur site et ne nécessitent pas d'équipement de levage lourd, ce qui réduit les risques d'accidents et permet des processus de construction plus efficaces. D'autre part, la réduction du poids se traduit directement par une logistique simplifiée et une diminution des émissions de carbone lors du transport.

Par ailleurs, les limitations de poids peuvent restreindre la taille des modules préfabriqués. Les grands modules préfabriqués sont souhaitables car ils accélèrent l'assemblage sur site et permettent une mise en service plus rapide.

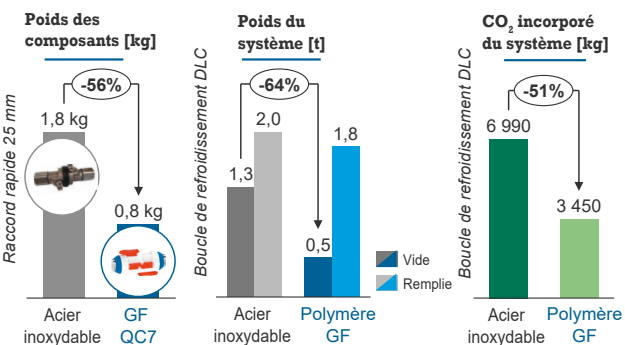


Figure 11 : Comparaison de gros raccords rapides et d'une boucle DLC complète, basée sur le design de référence EcoStruxure 109 de Schneider Electric. Le calcul des émissions de CO₂ ne présente que les valeurs de la phase A1 (matière première). Le jeu de données générique « world » d'ecoinvent est utilisé.

25. Schneider Electric [SE], sans date
26. ecoinvent Association, 2024

6.3 Performances thermiques et efficacité énergétique

Les polymères présentent une conductivité thermique intrinsèquement plus faible (environ 0,23 W/mK pour le PP-H²⁷) que les métaux (environ 16 W/mK pour l'acier inoxydable SS316²⁸), minimisant ainsi les transferts de chaleur des liquides vers l'environnement. Dans les espaces libres, cela permet au système DLC de transporter une plus grande quantité de chaleur, évitant ainsi sa dissipation dans l'air et la surcharge du système de climatisation. De plus, l'utilisation d'un système de récupération de chaleur résiduelle (RCR) permet de réutiliser une plus grande part de la chaleur directement issue du circuit DLC. Les premiers systèmes RCR dans les data centers ont été mis en service, par exemple, en Finlande et en Suède²⁹, et, sous l'impulsion des réglementations et des préoccupations environnementales, la question de la réutilisation de la chaleur est en plein essor.

Des économies d'énergie supplémentaires peuvent être réalisées grâce à l'utilisation de tuyauteries en polymères pré-isolées, ce qui, dans le cas du data center Baden Cloud à Appenweiler, en Allemagne, a permis d'obtenir une efficacité énergétique supérieure de 30 %, un résultat impressionnant³⁰.

La fabrication énergivore de produits métalliques est la principale raison des importantes économies de CO₂ incorporé réalisées grâce à l'utilisation de systèmes de tuyauterie en polymères. De plus, leur légèreté est à l'origine de nombreux avantages en matière de durabilité et de facilité de manipulation.

27. GF Piping Systems, PROGEF, sans date

28. SteelPRO Group, sans date

29. Paulsson, Lundgren and Pohjanpalo, 2025

30. Georg Fischer Piping Systems Ltd and Leitwerk AG, 2023

7. De la théorie à la pratique

Bien que les systèmes de tuyauterie en polymères présentent des avantages indéniables en termes de performance, de fiabilité et de durabilité, leur mise en œuvre réussie dans les systèmes de refroidissement liquide direct repose sur la capacité à mettre la théorie en pratique. C'est là que le savoir-faire en ingénierie, la qualité éprouvée des produits et une compréhension globale du système deviennent essentiels. GF bénéficie de plusieurs décennies d'expérience dans la tuyauterie pour applications critiques et propose une gamme de solutions spécialement conçues pour répondre aux exigences de refroidissement des data centers.

7.1 Solutions haute performance pour un débit optimal

La gamme de refroidissement liquide direct de GF, LiquidCore³¹, est spécifiquement conçue pour optimiser le débit. L'amélioration des caractéristiques d'écoulement minimise la perte de charge du circuit de refroidissement et se traduit directement par une réduction de la consommation électrique de la pompe de circulation, un coût d'exploitation important dans les data centers. Par exemple, la nouvelle vanne Quick Connect 700 (QC7) de GF présente une ouverture environ 10 % plus large, ce qui se traduit par un débit amélioré d'environ 25 % par rapport à la solution couramment utilisée^{32,33}. De même, la conception circulaire du collecteur GF offre de meilleures performances d'écoulement que les collecteurs rectangulaires traditionnels, permettant des densités de racks plus élevées tout en conservant des dimensions extérieures similaires.

Un exemple de simulation est illustré aux Figures 12 et 13. Ces figures montrent la densité de racks maximale pouvant être atteinte tout en maintenant une perte de charge inférieure à 50 mbar (0,73 psi) par collecteur. Les simulations sont réalisées avec du PG25 comme fluide caloporteur à 30 °C dans un collecteur à 44 branches équipé de raccords de 6,35 mm (1/4 po).

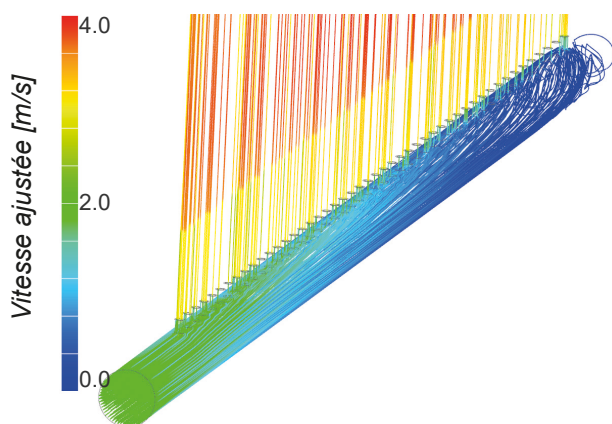


Figure 12 : Simulation d'écoulement dans un collecteur à 44 branches équipé de raccords de 6,35 mm (1/4 pouce).

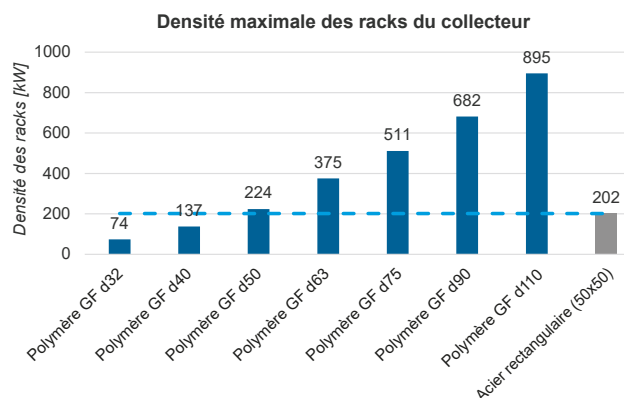


Figure 13 : Simulation de différentes conceptions de collecteurs. La densité maximale de racks obtenue avec des collecteurs circulaires en polymère de différentes tailles (en bleu) est comparée à celle d'un collecteur rectangulaire en acier (en gris). Le fluide caloporteur utilisé est du PG25 à 30 °C. La densité de racks est limitée par une perte de charge maximale de 50 mbar par collecteur.

7.2 Qualité et fiabilité sans compromis

Pour garantir la continuité des opérations critiques, les systèmes de tuyauterie et les composants de GF sont fabriqués et testés selon des normes de qualité internationales rigoureuses. La performance à long terme est vérifiée par des tests statiques et dynamiques, incluant des tests d'éclatement et de chute, des cycles thermiques, la résistance aux pulsations et des simulations d'endurance.

GF propose :

- des tests d'étanchéité à 100 % pour les composants de ses systèmes DLC
- une garantie sur l'ensemble du système

Cette gestion de la qualité sans compromis garantit une étanchéité parfaite et une fiabilité opérationnelle optimale, même dans les environnements de data centers les plus exigeants.

31. GF Piping Systems, LiquidCore, sans date

32. Staubli, 2024

33. Danfoss, 2025

7.3 Plus de 35 ans d'expertise éprouvée dans les environnements critiques

GF possède une vaste expérience dans la fourniture de systèmes de tuyauterie aux industries les plus exigeantes, telles que la microélectronique, où l'ultra-haute pureté, la performance des matériaux et le respect des engagements opérationnels sont essentiels. La capacité de l'entreprise à répondre aux normes rigoureuses de ces industries est attestée par de nombreuses récompenses reconnaissant l'excellence de ses performances et de la qualité de ses produits, comme le prix Intel EPIC Supplier Award (décerné pour l'année 2025) et le prix d'excellence de TSMC.

7.4 Technologie de soudage de pointe

Les applications critiques, comme le DLC, nécessitent des connexions extrêmement fiables. C'est pourquoi GF est pionnière dans le soudage par fusion infrarouge des polymères depuis 1991. Étant donné que la plupart des problèmes de soudage sont dus à des erreurs humaines, l'automatisation intelligente, associée à une traçabilité complète pour garantir la responsabilité et pour faciliter l'inspection après installation, est essentielle pour éviter des erreurs coûteuses.

C'est pourquoi GF adopte une approche globale, proposant une technologie de soudage automatisée de pointe, des outils d'inspection non destructive perfectionnés et une plateforme numérique assurant une traçabilité complète. De plus, GF dispense des formations certifiées de haute qualité à ses clients du secteur des machines.

7.5 Préfabrication

GF propose des services de préfabrication complets grâce à ses 15 sites de préfabrication répartis dans le monde entier. Environ 40 % des défaillances de tuyauterie survenant dans les 5 premières années étant dues à des erreurs d'installation³⁴, la préfabrication est essentielle pour améliorer la fiabilité. Les grands tronçons préfabriqués, testés et fabriqués en usine dans un environnement contrôlé, minimisent le nombre de connexions sur site ce qui réduit considérablement le risque d'erreurs d'installation⁹.

La préfabrication accélère également le processus d'installation et réduit le besoin de main-d'œuvre qualifiée et spécialisée sur site. Un fournisseur de services cloud irlandais a démontré le gain de temps considérable permis par la préfabrication et la fabrication hors site, en réduisant le délai d'installation sur site de 6 mois à 6 semaines³⁵.

7.6 Une conception experte

En tant que chef de file des fournisseurs de systèmes de tuyauterie en polymères pour applications industrielles, GF possède une vaste expérience et accompagne ses clients dès la conception. Notre service d'ingénierie avancé inclut la conversion sécurisée des conceptions métalliques en conceptions polymères, avec des capacités complètes de simulation numérique des fluides (CFD) pour l'optimisation du débit. GF propose également l'analyse des contraintes des tuyauteries, la conception de supports sécurisés et l'analyse sismique, ainsi qu'un programme de formation certifié pour les installateurs.

La gamme GF LiquidCore offre un refroidissement liquide haute performance avec un débit optimisé, réduisant la consommation d'énergie et permettant des densités de racks plus élevées. S'appuyant sur des normes de qualité rigoureuses, une technologie de soudage avancée et des services de préfabrication, GF garantit fiabilité et rapidité d'installation. Grâce à sa présence mondiale et à son expertise en ingénierie, GF fournit des solutions complètes pour les environnements de data centers critiques.

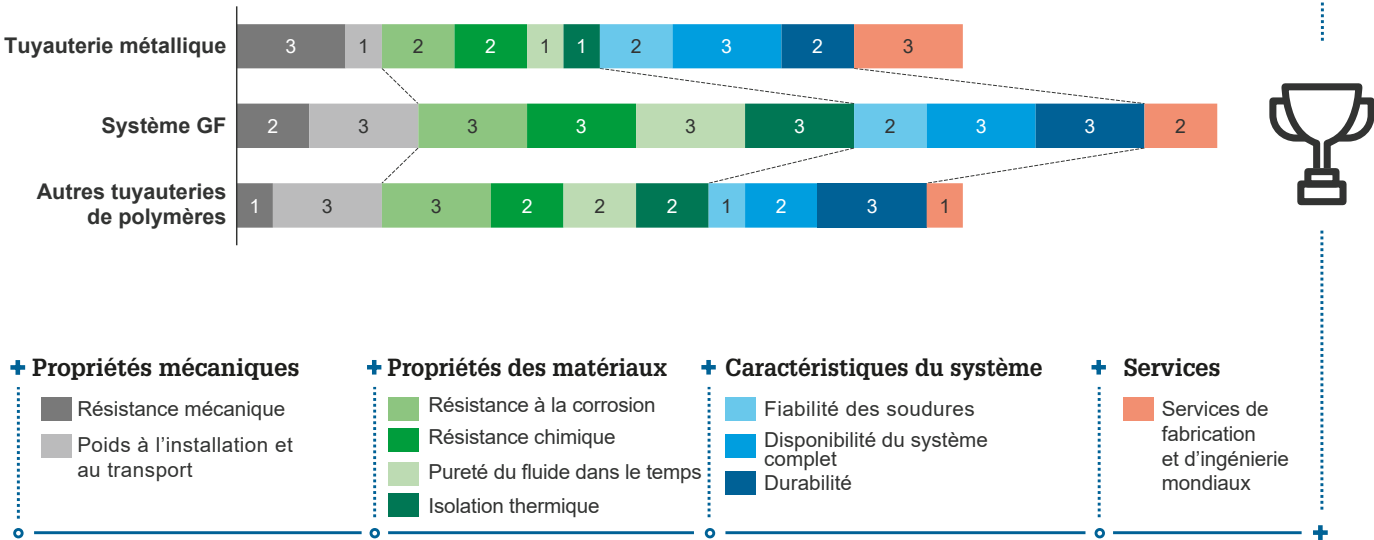
9. Mitchell, D. et al., 2024

34. Plastic Pipe Database Committee, 2024

35. Georg Fischer Piping Systems Ltd, 2023

8. Conclusion – Pérennisez votre infrastructure de refroidissement

Comparaison de différents systèmes de tuyauterie pour data centers
3 = meilleures performances, 1 = performances les plus faibles parmi les groupes comparés



Présence mondiale, assistance locale

GF s'engage à accompagner ses clients à chaque étape de leurs projets, de la planification à la mise en service. Avec des filiales commerciales dans 33 pays et 40 sites de production à travers le monde, GF opère selon une approche de proximité, garantissant à ses clients un service réactif, des délais de livraison courts et une assistance technique personnalisée. Quinze centres de fabrication répartis dans le monde entier permettent d'accélérer les délais de réalisation des projets grâce à une production en parallèle et à une installation sur site simplifiée. GF est votre partenaire de confiance pour la construction de data centers à l'international, que ce soit à Seattle, Schaffhouse ou Singapour.

La recherche constante d'une efficacité et d'une durabilité accrues en matière de refroidissement a favorisé l'essor du refroidissement liquide direct (DLC). Dans ce contexte en constante évolution, le choix du système de tuyauterie est primordial pour garantir la performance, la fiabilité et la responsabilité environnementale à long terme de ces systèmes de refroidissement évolués.

GF est à l'avant-garde de cette évolution, promouvant l'utilisation de polymères haute performance comme alternative supérieure aux tuyauteries métalliques traditionnelles. Les systèmes de tuyauterie en polymères haute performance offrent une combinaison convaincante d'avantages : résistance à la corrosion à long terme, surfaces internes ultra-lisses et technologie de fusion infrarouge étanche. Ces atouts se traduisent par des performances hydrauliques améliorées, une compatibilité étendue avec les liquides de refroidissement, une pureté accrue de ces

derniers, une installation et un déploiement rapides et fiables, ainsi qu'une réduction des coûts globaux.

De plus, la légèreté des tuyauteries en polymères, associée à leur facilité de manipulation et d'installation, permet la construction de modules préfabriqués de plus grande taille, ce qui renforce la fiabilité, accélère les délais de réalisation des projets et améliore la sécurité des travailleurs. Sa faible conductivité thermique minimise les pertes de chaleur, optimisant ainsi l'efficacité énergétique, notamment pour les applications de récupération de chaleur résiduelle.

Enfin, la fabrication de tuyauteries en plastique génère des émissions de carbone nettement inférieures à celles des tuyauteries métalliques, répondant ainsi à la demande croissante de solutions durables pour les data centers.

L'engagement de GF envers l'innovation, la qualité et le service client se manifeste par le développement de solutions de pointe telles que LiquidCore et son rôle pionnier dans le domaine du soudage infrarouge. Cette méthode de soudage sans contact garantit la création de soudures propres et homogènes, d'une résistance et d'une fiabilité exceptionnelles, renforçant ainsi l'intégrité et la longévité des systèmes DLC. Grâce à une gamme complète de solutions de tuyauterie polymère haute performance, une présence mondiale et une expertise pointue dans les applications critiques, GF est idéalement positionnée pour accompagner les opérateurs de data centers dans la conception, la construction et l'exploitation de leurs systèmes DLC. En choisissant GF, les clients s'associent à un partenaire fiable, dédié à la fourniture de solutions durables, efficaces et économiques, répondant aux enjeux évolutifs du secteur des data centers.

Références

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE] (2019) Water-cooled servers: Common designs, components and processes.
Disponible à l'adresse : https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Bookstore/White%20paper_TC099-WaterCooledServers.pdf (Consulté le : 5 juin 2025).
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE] Technical Committee 9.9 (2021) Emergence and expansion of liquid cooling in mainstream data centers, White Paper. ASHRAE.
https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/emergence-and-expansion-of-liquid-cooling-in-mainstream-data-centers_wp.pdf.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME) (sans date) ASME B31.3: Process piping; ASME B31.9: Building services piping (HVAC systems). ASME.
- American Welding Society (AWS) (sans date) AWS D10.18: Guide for welding austenitic stainless-steel pipe. AWS.
- ASTM International (sans date) ASTM A380/A380M: Standard practice for cleaning, descaling, and passivation of stainless steel parts, equipment, and systems; ASTM A967/A967M: Standard specification for chemical passivation treatments for stainless steel parts. ASTM International.
- Azarifar, M. et al. (2024) 'Liquid cooling of data centers: A necessity facing challenges', Applied Thermal Engineering, 247.
Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123112>
- Castrol (sans date) Castrol ON direct liquid cooling PG 25: Product data sheet.
Disponible à l'adresse : [https://msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/C59CD4EF71E795E080258C4B001DA1D7/\\$File/wepp-deqblj.pdf](https://msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/C59CD4EF71E795E080258C4B001DA1D7/$File/wepp-deqblj.pdf) (Consulté le : 7 juillet 2025).
- Chinthaparthi, L.S.R. et al. (2024) 'Accelerated performance degradation of copper cold plates in direct-to-chip liquid cooled data centers', ASHRAE Journal, pp. 52–63.
- Danfoss (2025) Danfoss Hansen FD83 series coupling: Thermal management.
Disponible à l'adresse : <https://assets.danfoss.com/documents/latest/497642/AM430256898395en-000501.pdf>
- ecoinvent Association (2024) ecoinvent database.
Disponible à l'adresse : <https://ecoinvent.org/database/> (Consulté le : 14 décembre 2025).
- Georg Fischer Piping Systems (2003) Beta (β)-PP from Georg Fischer: A synonym for proven toughness and chemical resistance – latest findings. Georg Fischer Rohrleitungssysteme AG, Schaffhausen, Switzerland.
- Georg Fischer Piping Systems Ltd (2023) Saving time with engineering and offsite prefabrication: Hyperscale data center, Ireland.
Disponible à l'adresse : <https://www.gfps.com/content/dam/gfps.com/reference-cases/gfps-reference-case-engineering-prefabrication-hyperscale-data-center-dublin-en.pdf> (Consulté le : 5 août 2025).
- Georg Fischer Piping Systems Ltd and Leitwerk AG (2023) Improving energy efficiency at BADEN CLOUD Data Center, Appenweier, Germany.
Disponible à l'adresse : <https://www.gfps.com/en-in/applications/chilled-water-on-rooftops.html>
- GF Industry and Infrastructure Flow Solutions (sans date) Chemical resistance tool.
Disponible à l'adresse : <https://www.gfps.com/com/en/downloads-tools/online-tools/chemical-resistance.html> (Consulté le : 5 juin 2025).
- GF Industry and Infrastructure Flow Solutions (sans date) LiquidCore: Engineered polymer piping system for direct-to-chip liquid cooling. Disponible à l'adresse : <https://www.gfps.com/com/en/products-solutions/innovation/liquidcore.html> (Consulté le : 14 décembre 2025).
- GF Piping Systems (sans date) PROGEF polypropylene piping system: Product brochure.
Disponible à l'adresse : <https://www.gfps.com/content/dam/gfps.com/brochures-and-flyers/en/gfps-00108-brochure-progef-en.pdf> (Consulté le : 14 décembre 2025).
- Gillis, R.J. and Gillis, J.R. (1996) Microbials: A comparative study of bacterial attachment to high-purity water system surfaces.
Disponible à l'adresse : <https://scholarworks.montana.edu/server/api/core/bitstreams/4da3e703-e891-49fd-a5cc-f237d517fae0/content> (Consulté le : 5 juin 2025).
- Green Revolution Cooling [GRC] (2024) Comparing data center cooling technologies: Which is best for your operation?
Disponible à l'adresse : <https://www.grcooling.com/learning-center/data-center-cooling-technologies-comparison-ebook/> (Consulté le : 5 juin 2025).
- He, X., Ahn, T. and Sippel, T. (2012) Corrosion of borated stainless steel in water and humid air.
Disponible à l'adresse : <https://www.nrc.gov/docs/ML1129/ML112920913.pdf> (Consulté le : 5 juin 2025).

- Hyde, F.W., Alberg, M. and Smith, K. (1997) 'Comparison of fluorinated polymers against stainless steel, glass and polypropylene in microbial biofilm adherence and removal', *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 19(2), pp. 142–149. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/sj.jim.2900448>
- IBM (2025) Water cooling system specification and requirements. Disponible à l'adresse : <https://www.ibm.com/docs/en/power-sys-solutions/0008-DEA> (Consulté le : 5 juin 2025).
- Microsoft (2024) Microfluidics could be the key to cooling the next generation of AI chips. Microsoft News, 20 May. Disponible à l'adresse : <https://news.microsoft.com/source/features/innovation/microfluidics-liquid-cooling-ai-chips/> (Consulté le : 16 décembre 2025).
- Mitchell, D. et al. (2024) OCP WP submittal: Modular TCS at CloudScale – design, delivery and selection guidance (DLM1). Open Compute Project, 40 pp.
- Mulji, N. (2025) Direct liquid cooling for AI systems: Design requirements from the processors to the data center. Présenté lors de la conférence NVIDIA GTC 2025, au San Jose Convention Center, le 18 mars.
- National Institute of Standards and Technology (sans date) Isobaric properties for water. https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?P=1.01325&TLow=5&THigh=30&TInc=5&Digits=5&ID=C7732185&Action=Load&Type=IsoBar&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=uPa*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF (Consulté le : 3 novembre 2025).
- Open Compute Project [OCP] (sans date) Tsunamis of liquid-cooled IT hitting data centers: Modular deployment at CloudScale. OCP Modular TCS Workstream (Consulté le : 11 décembre 2025).
- Paulsson, L., Lundgren, K. and Pohjanpalo, K. (2025) Power-hungry data centers are warm-ing homes in the Nordics.
- Plastic Pipe Database Committee (2024) Plastic piping data collection initiative: Status report. Disponible à l'adresse : https://www.aga.org/wp-content/uploads/2024/08/PPDC-Status-Report-June-2024_Latorea-Wilson.pdf
- Replumb Specialties Inc. (2024) Aquatherm piping failures, legal challenges, and prevention tips. Disponible à l'adresse : <https://replumbs.com/aquatherm-piping/>
- Schneider Electric [SE] (2025) Navigating liquid cooling architectures for data centers with AI workloads. White Paper 133. Disponible à l'adresse : https://www.se.com/ww/en/download/document/SPD_WP133_EN/ (Consulté le : 5 juin 2025).
- Schneider Electric [SE] (sans date) EcoStruxure reference design 109. Disponible à l'adresse : <https://download.schneider-electric.com/files> (Consulté le : 5 juin 2025).
- SteelPRO Group (sans date) Thermal conductivity of stainless steel. Disponible à l'adresse : <https://steelprogroup.com/stainless-steel/properties/thermal-conductivity/> (Consulté le : 14 décembre 2025).
- Stäubli (2024) TDU cooling: High-flow transfer TDU applications. Disponible à l'adresse : <https://www.staubli.com/content/dam/fcs/brochures/products/tdu/tdu-cooling-high-flow-transfer-couplings-staubli-en.pdf> (Consulté le : 5 juin 2025).
- The Electrochemical Society (sans date) Corrosion science. Disponible à l'adresse : <https://www.electrochem.org/corrosion-science> (Consulté le : 14 décembre 2025).
- The Engineering ToolBox (sans date) Surface roughness of ventilation ducts. Disponible à l'adresse : https://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-ventilation-ducts-d_209.html (Consulté le : 14 décembre 2025).
- Ul-Hamid, A. et al. (2017) 'Corrosion study of SS304 and SS316 alloys in atmospheric, underground and seawater splash zone in the Arabian Gulf', *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52(2), pp. 134–140. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1080/1478422X.2016.1213974>
- Zieliński, T.G. et al. (2020) 'Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media,' *Journal of Sound and Vibration*, 483, p. 115441. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115441>.

Excellence in Flow

Visitez notre site Web pour entrer en contact avec votre spécialiste local :
www.gfps.com/our-locations



Les informations et les données techniques (ci-après « Données ») contenues ici ne sont pas contractuelles, sauf mention explicite par écrit. Les données ne constituent pas une garantie expresse ou implicite des caractéristiques et ne garantissent pas des propriétés spécifiques ou une durabilité. Toutes les données sont sujettes à modification. Les conditions générales et les conditions de vente de Georg Fischer Piping Systems sont applicables.



GFDO_WP_00001_EN (08.26)
© Georg Fischer Piping Systems Ltd
8201 Schaffhausen/Suisse, 2026