

Ethernet temps réel, un paysage en pleine mutation

Les réseaux Ethernet industriels, ou Ethernet temps réel, ont connu un essor considérable au cours des dernières années, contrairement aux bus de terrain historiques qui, s'ils sont encore abondamment exploités, ont leur heure de gloire derrière eux. Si les protocoles Ethernet temps réel populaires ont enrichi le standard Ethernet au moyen d'extensions afin de répondre aux exigences des applications devant fonctionner en temps réel, le standard TSN (Time Sensitive Networking) ouvre à présent de nouvelles possibilités pour l'Ethernet temps réel.

Dans le contexte de l'automatisation industrielle et des technologies de commande moteur, la notion de temps réel est synonyme de sécurité et de fiabilité et implique des cycles temporels compris entre moins de 10ms et quelques microsecondes. Pour remplir ces exigences, le protocole Ethernet a également dû s'enrichir de capacités de traitement en temps réel.

Pour satisfaire aux exigences de l'automatisation en temps réel, la bande passante et la latence de transmission doivent être garanties. Même si ces bandes passantes sont généralement réduites (de l'ordre de quelques dizaines d'octets par équipement), le canal de transmission doit être disponible à chaque cycle d'entrée/sortie avec la latence requise. Or le protocole Ethernet classique ne garantit ni la latence, ni la bande passante. Au contraire, un réseau Ethernet peut supprimer des trames à tout moment si son bon fonctionnement l'exige. Quelles en sont les implications ?

Ethernet est un réseau dit à passerelle (bridged network) où les trames Ethernet sont envoyées d'un point à un autre, soit d'une extrémité jusqu'au switch (pont ou passerelle) puis, le cas échéant, vers d'autres

AUTEUR

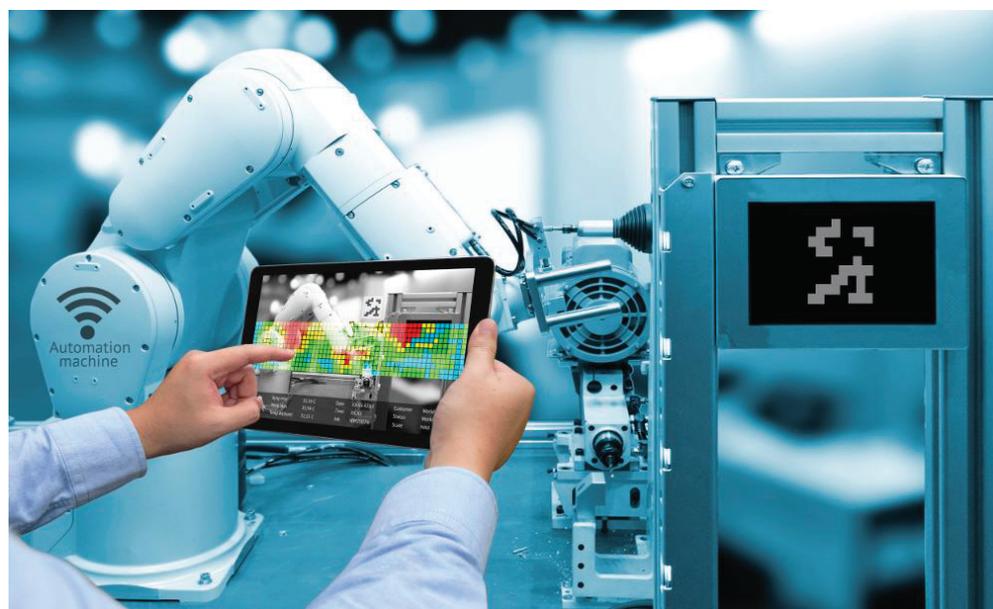


Volker Goller,
ingénieur
d'application
système,
Analog Devices

ponts ou passerelles, et ce jusqu'à l'autre extrémité. Cette architecture fonctionne dans une large mesure en auto-configuration. Les passerelles reçoivent d'abord des trames entières avant de les transmettre. C'est à ce moment que surviennent les problèmes...

- En cas de trafic élevé, si le nombre de trames à stocker est supérieur à la capacité de la mémoire tampon (buffer) de la passerelle, les nouvelles trames entrantes sont rejetées ;
- les trames diffèrent en termes de longueur et sont donc retardées en fonction de leur longueur. Ceci entraîne des latences fluctuantes (gigue) ;
- dans la mesure où le port, par l'intermédiaire duquel le switch est supposé envoyer une trame, risque d'être occupé par d'autres trames jusqu'à la capacité maximale, des retards supplémentaires ont lieu.

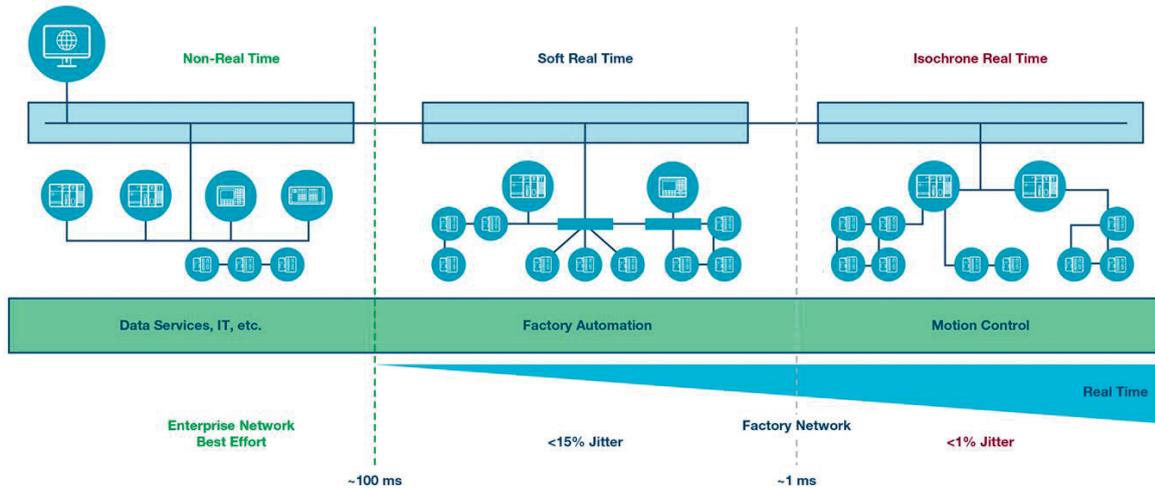
L'envoi d'une trame Ethernet de grande taille (1 522 octets) dure environ 124µs au débit de 100Mbit/s. Certains affirmeront que le protocole Ethernet fonctionne généralement de façon « satisfaisante » et qu'il est, d'une certaine manière, « juste » -deux qualificatifs qui n'ont aucune signification dans le contexte temps réel. Il ne suffit pas que les contraintes temps réel soient remplies dans des conditions normales. Elles doivent être respectées en permanence. Qui-conque habite à proximité d'une usine chimique ou d'une raffinerie l'aura compris. Les communications industrielles ne sont pas non plus considérées comme « justes » : une application de commande en boucle fermée, qui constitue l'opération la plus importante dans le domaine industriel, bénéficie systématiquement d'un traitement prioritaire (figures 1a et 1b).



• Dans le contexte de l'automatisation industrielle et des technologies de commande moteur, le protocole Ethernet a dû s'enrichir de capacités de traitement en temps réel.

1A LES DIFFÉRENTS TYPES DE COMMUNICATIONS DANS LE DOMAINE DE L'AUTOMATISATION

Pour satisfaire aux exigences de l'automatisation en temps réel, la bande passante et la latence de transmission doivent être garanties. Même si ces bandes passantes sont généralement réduites, le canal de transmission doit être disponible à chaque cycle d'entrée/sortie avec la latence requise.



Les extensions temps réel des protocoles PROFINET et EtherCAT

Aucune réponse n'étant apportée à ces problèmes par l'IEEE, l'organe responsable de la normalisation du protocole Ethernet (figure 2), les industriels ont développé leurs propres solutions, démontrant une fois de plus leur capacité d'innovation. Ces solutions, avec leurs atouts et leurs lacunes, s'adressent à des marchés différents.

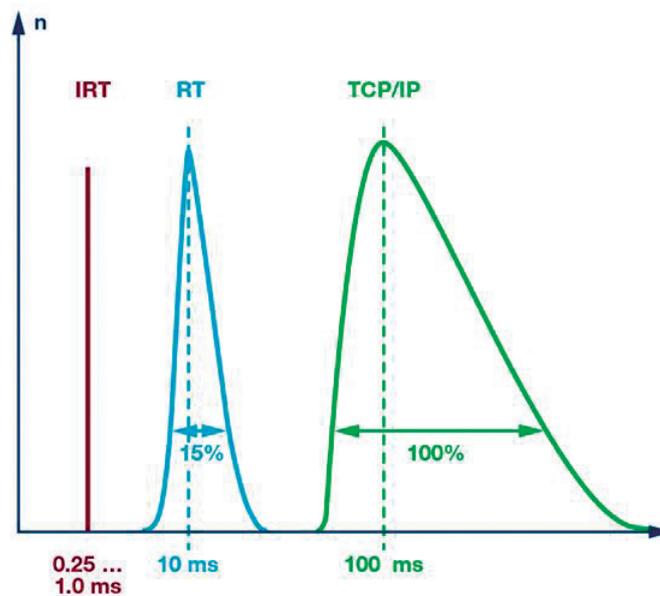
PROFINET : un protocole universel

Le standard de communication PROFINET se compose de deux solutions complémentaires (figure 3). PROFINET RT est une solution pour l'automatisation industrielle dont le temps de cycle peut atteindre 1 ms. Cette variante est directement dérivée de l'Ethernet standard. Les possibilités offertes par Ethernet (par exemple, la priorisation en fonction de la qualité de service - QoS) sont utilisées pour accorder la priorité au trafic en temps réel. C'est utile, mais la qualité de service ne résout pas totalement le problème des ressources et de la latence. Le standard RT est donc utilisé pour des applications ayant des contraintes temps réelles relaxées (soft real time). Sa compatibilité avec d'autres protocoles (HTTP, SNMP et TCP/IP) employés dans le réseau constitue un atout évident de cette technologie.

Pour répondre à des besoins en temps réel plus contraignant (hard

1B LATENCE ET GIGUE TYPIQUES DES PROTOCOLES TEMPS RÉEL ISOCHRONES (IRT), SOFT (RT) ET TCP/IP

Le protocole Ethernet classique ne garantit ni la latence, ni la bande passante. Au contraire, un réseau Ethernet peut supprimer des trames à tout moment si son bon fonctionnement l'exige.

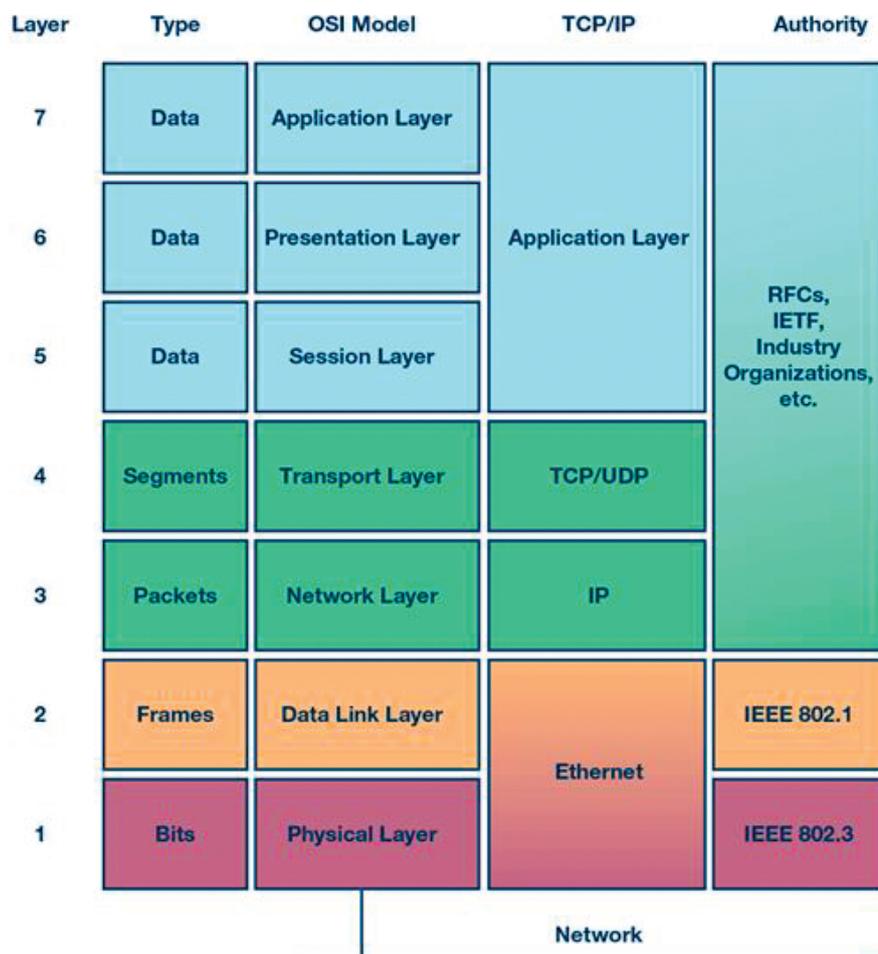


real time), PROFINET propose l'extension IRT dite temps réel isochrone (figure 4). Dans ce cas, une partie de la bande passante Ethernet est exclusivement réservée au trafic IRT grâce à une extension du matériel Ethernet standard et à la synchronisation précise des horloges dans les nœuds IRT. Résultat, un canal (phase rouge) peut bloquer le trafic ordinaire à chaque cycle, seules les trames IRT de la phase rouge pouvant emprunter le réseau. De plus, les participants au réseau envoient les trames IRT à des moments prédéfinis, ce qui maximise l'efficacité au

cours de la phase rouge. Les trames IRT circulent dans le réseau quasiment sans erreur. Entre autres avantages, cette méthode limite au strict minimum la durée de la phase rouge pendant laquelle seules les trames IRT sont transmises. La phase rouge peut occuper jusqu'à 50 % de la bande passante du canal Ethernet. Comme nous l'avons déjà indiqué, une trame Ethernet complète (1 552 octets) est transmise en environ 124 μs sur une liaison filaire. Si le protocole PROFINET IRT consomme la moitié de la bande passante, le cycle le plus rapide sera de

2 ETHERNET DANS LE MODÈLE OSI À 7 COUCHES DE L'ISO

Aucune réponse, jusqu'à une date récente, n'ayant été apportée aux problèmes du temps réel par l'IEEE, l'organe responsable de la normalisation du protocole Ethernet, les industriels ont développé leurs propres solutions.



$2 \times 124 \mu s = 248 \mu s$, soit $250 \mu s$ en arrondissant. C'est la seule manière de faire cohabiter d'autres protocoles (HTTP, par exemple) sans aucune modification. Il est possible d'atteindre des cycles encore plus courts, de l'ordre $31,25 \mu s$, grâce aux optimisations de la version PROFINET 2.3 pour le protocole IRT (avec notamment les procédures Fast Forwarding, Dynamic Frame Conditioning et Fragmentation).

EtherCAT: le bus de terrain Ethernet

Les développeurs du bus de terrain EtherCAT ont dû satisfaire d'autres exigences initiales. EtherCAT est un bus de terrain reposant sur l'Ethernet physique, c'est-à-dire la couche 1 du modèle OSI (Figure 3). Même la couche 2 est optimisée pour les applications de bus de terrain et des débits élevés. EtherCAT ne dispose pas du mode « passerelle » classique

d'Ethernet, mais utilise un télégramme à trames de sommation, qui rend la transmission des données particulièrement efficace. Contrairement à l'Ethernet ordinaire, où une trame séparée est envoyée par chaque équipement participant aux communications entre périphériques, EtherCAT envoie une trame par cycle. Cependant, cette trame contient toutes les données correspondant aux équipements concernés. Pendant que la trame EtherCAT est acheminée au sein d'un équipement, les données associées à ce dernier sont insérées et extraites de la trame à la volée, une méthode qui permet d'obtenir des temps de cycle très courts, parfois inférieurs à $31,25 \mu s$.

EtherCAT dispose également d'une synchronisation temporelle. De nombreux efforts ont été déployés pour que les interfaces Ethernet sur PC qui sont loin d'être idéales puissent être utilisées comme maîtres

par EtherCAT. Le trafic Ethernet –Web ou TCP/IP– peut uniquement être transporté par petites portions en mode « piggyback » sur EtherCAT ; la cohabitation directe sur liaison filaire n'est pas possible.

Quid des autres protocoles ?

Le protocole POWERLINK adopte une approche similaire à EtherCAT ; il prend le contrôle total d'Ethernet et transporte les applications IP vers les nœuds en mode piggyback (figure 3). C'est toutefois leur seul point commun et s'il n'utilise pas de protocole de trames de sommation, POWERLINK est néanmoins tout aussi performant.

À l'image de PROFINET IRT, le protocole SERCOS (Serial Real-time Communications System) dispose d'une bande passante réservée, mais utilise un protocole de trames de sommation interne et peut cohabiter avec d'autres protocoles.

L'heure des réseaux TSN a sonné!

L'IEEE a abordé le sujet du temps réel dans le cadre du protocole AVB (Audio/Video Bridging). En vue d'améliorer le protocole, les communications en temps réel les plus complexes de l'industrie ont également été prises en compte. La désignation initiale de l'ensemble de normes, AVB2, a été transformée en TSN pour «Time-Sensitive Networking». Avec ces normes, il est désormais possible d'utiliser une version unifiée et déterministe d'Ethernet.

En fait, cette évolution simplifie considérablement les choses. Par exemple, les réseaux industriels les plus couramment utilisés sont presque tous définis pour fonctionner à 100Mbit/s. Aujourd'hui cependant, l'Ethernet Gigabit et l'Ethernet à 10Mbit/s sont au cœur d'applications particulières. Les normes TSN couvrent tous les débits et évitent de réinventer la roue: sans TSN, toutes les normes existantes devraient être redéfinies pour le Gigabit, ce qui entraînerait des coûts de développement matériel doublés d'une fragmentation du marché.

Traitement en temps réel et TSN

Le standard TSN étend la couche 2 d'Ethernet en vue d'inclure une série de mécanismes nécessaires au fonc-

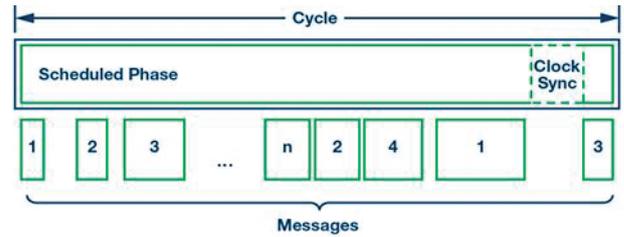
3 DIFFÉRENTES APPROCHES ETHERNET TEMPS RÉEL POUSSÉES PAR L'INDUSTRIE

Avec chacune leurs atouts et leurs lacunes, les différentes extensions temps réel apportées par les industriels à l'Ethernet standard s'adressent à des marchés différents.

Unscheduled Network

- ▶ Cycle Times Down to 1 ms
- ▶ CIP Sync Provides 1588v2 Time to Nodes
- ▶ PROFINET RT (Class B) Has No Time Sync Mechanism for Nodes

EtherNet/IP

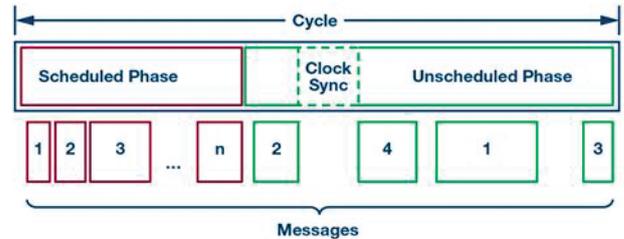


Scheduled Network

- ▶ Cycle Times Down to 31.25 µs
- ▶ PROFINET IRT (Class C) Time Sync in Unscheduled Phase
- ▶ SERCOS Scheduled Phase Encapsulated in 1 Message



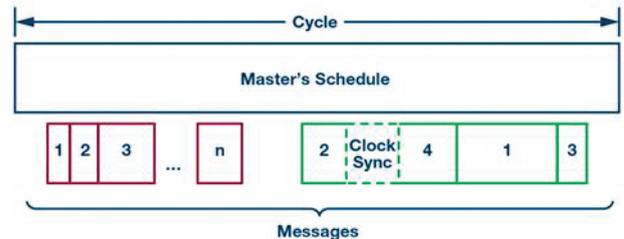
SERCOS international



Master/Slave Network

- ▶ EtherCAT
 - Cycle Times Down to 12.5 µs
 - Encapsulated in 1 Message
- ▶ POWERLINK
 - Cycle Times Down to 100 µs

EtherCAT



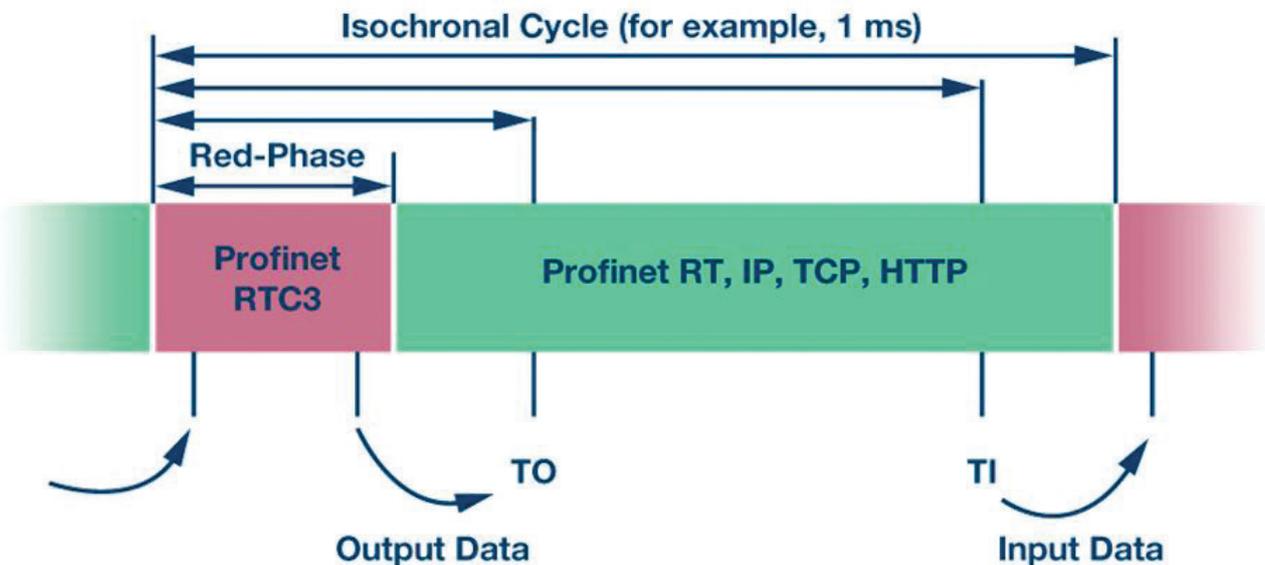
tionnement en temps réel (figure 5). La norme 802.1AS/802.1AS-Rev porte sur la synchronisation extrêmement précise des horloges du réseau. - L'option TAS (Time Aware Shaper) permet d'utiliser Ethernet avec un

ordonnancement strict. Avec cette solution, une ou plusieurs files d'attente du modèle QoS peuvent être bloquées/libérées à des moments spécifiques; - l'option « préemption » permet de

scinder les longues trames afin de minimiser le retard des trames prioritaires. Elle peut être utilisée pour optimiser la bande de garde de l'option TAS ou remplacer cette option au-dessus de 100Mbit/s;

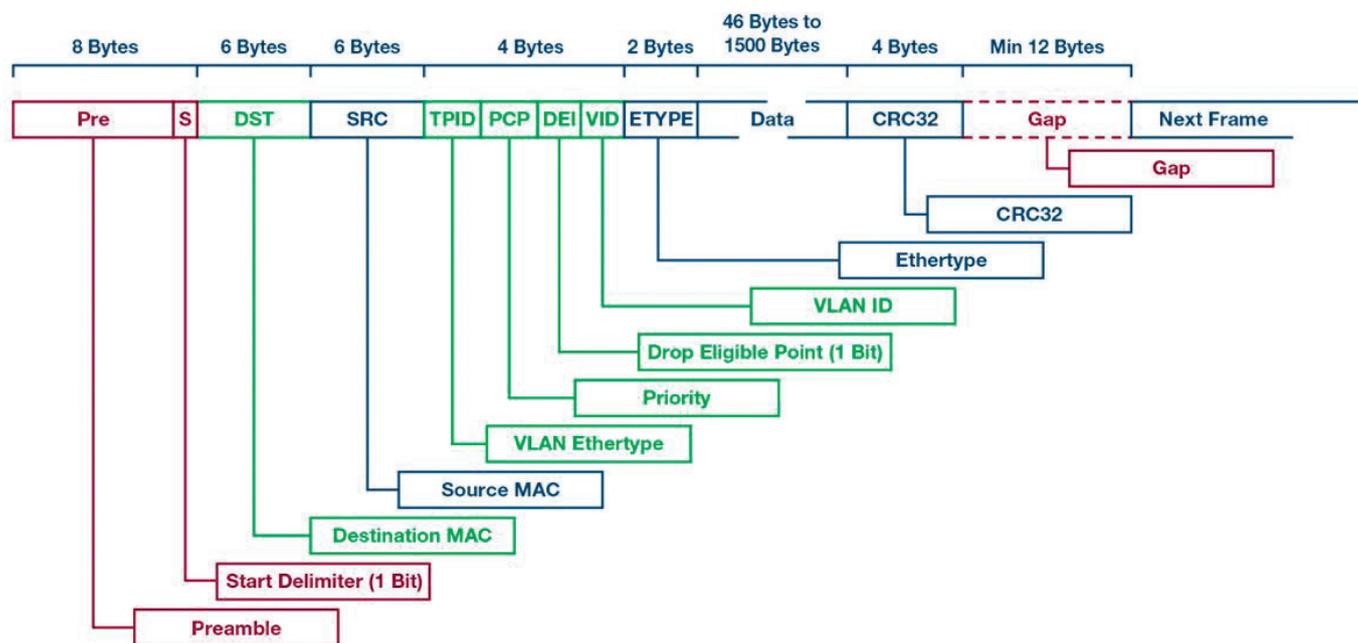
4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU STANDARD TEMPS RÉEL ISOCHRONE PROFINET IRT

Avec PROFINET IRT, une partie de la bande passante Ethernet est exclusivement réservée au trafic temps réel isochrone (IRT) grâce à une extension du matériel Ethernet standard et à la synchronisation précise des horloges dans les nœuds IRT. Résultat, un canal (phase rouge) peut bloquer le trafic ordinaire à chaque cycle, seules les trames IRT de la phase rouge pouvant emprunter le réseau.



5 IDENTIFICATION DU FLUX DE DONNÉES TSN DANS UNE TRAME ETHERNET

Le standard TSN (Time Sensitive Networking) de l'IEEE étend la couche 2 d'Ethernet en vue d'inclure une série de mécanismes nécessaires au fonctionnement en temps réel.



- l'option « duplication / élimination de trame pour la fiabilité » peut être utilisée pour définir des chemins redondants à travers le réseau – par exemple, dans des réseaux en anneau;

- en utilisant un réseau défini par logiciel (SDN for Software Defined Network), les trames ne sont plus transférées vers la destination au moyen de l'adresse MAC matérielle du nœud de destination, mais par une combinaison d'adresses MAC spéciales (adresses MAC de multi-diffusion administrées localement) et d'identifiants VLAN. La manière dont ces trames sont routées sur le réseau n'est alors plus déterminée de façon automatique, mais configurée par logiciel. Cette combinaison d'adresses MAC de multidiffusion et d'identifiants VLAN s'appelle le stream ID; toutes les trames TSN dont le stream ID est identique forment un flux TSN. Un flux TSN a toujours un seul expéditeur, mais peut avoir plusieurs destinataires.

Les flux TSN peuvent à présent être configurés en fonction des ressources existantes, de telle sorte qu'aucune trame ne sera supprimée. Les passerelles utilisent désormais leurs ressources pour assurer le transfert des flux TSN sans perte. Le trafic standard (Ethernet standard, IP, Web), quant à

lui, est traité normalement avec les ressources restantes (mémoire/bande passante).

Et au-dessus de la couche 2 ?

Derrière chaque protocole Ethernet, un organisme contribue à l'amélioration de la standardisation et à la popularisation des différentes variantes. Chacun de ces organismes a formulé une stratégie TSN. C'est pourquoi les protocoles existants intégreront quasiment tous une fonctionnalité TSN, sous une forme ou une autre. Reprenons nos exemples. Pour PROFINET, le chemin vers TSN est relativement bref en raison de la riche expérience disponible dans le domaine du conditionnement sensible au temps (déjà utilisé de manière très similaire à l'IRT) et du fait que la coexistence des protocoles industriels et informatiques a toujours été prise en charge. Peu de changements interviennent au niveau de l'utilisateur, de sorte qu'un environnement familier peut se traduire par de nouvelles performances. Les protocoles EtherCAT et SERCOS rendront le TSN accessible au-delà du niveau du terrain. A titre d'exemple, le protocole d'automatisation EtherCAT (EAP, EtherCAT Automation Protocol) convient parfaitement à la mise en réseau de segments

EtherCAT classiques via TSN, moyennant une faible surcharge. Il convient toutefois de compter avec l'apparition de nouveaux venus.

A titre d'exemple, un groupe est en train de définir un tout nouveau protocole Ethernet industriel. Le standard OPC UA (OPen Connectivity - Unified Architecture) est alors utilisé en tant que couche d'application. Le protocole TSN est considéré comme un moyen de rendre ce protocole compatible avec les opérations en temps réel. Toutefois, il reste encore du travail à accomplir dans ce domaine. Une nouvelle couche de transport pour l'architecture unifiée OPC – le protocole OPC UA Pub/Sub (modèle Publisher-Subscriber) – est nécessaire pour le transport des données.

Quoi qu'il en soit, des performances élevées ne sont pas nécessairement un plus dans les applications en temps réel. Aujourd'hui, nous utilisons l'Ethernet à 100Mbit/s dans le secteur de l'automatisation industrielle, et l'Ethernet Gigabit sera bientôt disponible. Or, un débit élevé n'est pas automatiquement synonyme de taux de latence et de transmission garantis. C'est pourquoi, pour le temps réel « hard », des mécanismes spéciaux demeurent indispensables. Avec le TSN, ils bénéficient désormais d'une standardisation.