

La technologie TSN se met au service des réseaux Ethernet pour automatismes industriels

La technologie réseau TSN (Time-Sensitive Networking) est une extension du standard Ethernet de l'organisme IEEE conçue pour rendre les réseaux Ethernet plus déterministes. Elle va profiter aux secteurs qui utilisent des liaisons de communication temps réel entre plusieurs équipements connectés en réseau, tels que l'automobile, l'industriel ou les systèmes audio à haute performance. Texas Instruments décrit ici la structure et les divers protocoles décrits dans le standard TSN.

Pour les particuliers comme pour les entreprises, les communications Ethernet et Ethernet sans fil reposent essentiellement sur la largeur de la bande passante. Ainsi, lorsqu'on souhaite regarder une vidéo sur Internet, on est prêt à tolérer un certain laps de temps avant que la vidéo se lance effectivement. Certes, les utilisateurs préfèrent les interactions rapides, mais en moyenne, ils acceptent une baisse des performances à raison d'un clic sur cent. En revanche, ils sont généralement mécontents si la qualité d'une vidéo est mauvaise ou si la lecture s'interrompt brutalement. En matière de systèmes de contrôle/commande, tels ceux qui équipent les voitures, les lignes de production ou les salles de concert, ces délais, même rares, sont inacceptables. Deux critères se révèlent ici essentiels : la latence et la gigue, c'est-à-dire la variation de la latence des données de contrôle/commande échangées. C'est la durée maximale nécessaire à un paquet de données pour atteindre sa destination qui détermine le cycle de communication ou la fréquence de contrôle du réseau.

Le tableau ci-contre présente un certain nombre de paramètres réseau pertinents pour différentes applications. La taille et la topologie des réseaux concernés peuvent être fixes (adaptés à l'application en question) ou variables. En termes de nombre de nœuds connectés et d'itinéraire suivi par un paquet de données, Internet est l'exemple le plus défavorable. La latence s'y mesure en secondes et varie fortement lors-

AUTEUR



Pekka Varis, responsable de la technologie pour la gamme de processeurs, et **Thomas Leyrer**, membre émérite du personnel technique, Texas Instruments.

qu'on réitère le transfert d'un paquet. Par contraste, dans un système de communication déterministe en temps réel via Ethernet, le nombre d'équipements reliés au réseau est généralement limité. Ainsi, dans une machine-outil, exemple classique d'un matériel embarqué, le nombre de moteurs connectés via Ethernet à un même système de commande est typiquement inférieur à cent. De nouveaux paramètres de commande moteur sont transmis toutes les 250 µs. Cette configuration fixe, pré-intégrée, nécessite un réseau Ethernet déterministe et temps réel, avec des cycles courts et une distribution horaire ultraprécise.

Dans les usines modernes, tous les systèmes de production sont connectés au sein d'un tel réseau. Et, dans ce cadre, un réseau critique au niveau

temporel (Time-Sensitive Network) est une technologie clé pour interconnecter divers systèmes de commande en temps réel (figure 1). Bien que les critères en termes d'échelle, de durée de cycle ou de précision puissent varier, tous les systèmes de contrôle/commande peuvent utiliser la même interface de communication pour échanger des données de manière déterministe. Chaque système de contrôle/commande compte un grand nombre de capteurs et d'actionneurs reliés directement au réseau Ethernet temps réel ou bien via un concentrateur situé sur ce même réseau au travers de connexions série en point à point. Dans ce cadre, le standard TSN, avec ses performances déterministes, est particulièrement avantageux au niveau « terrain » sur les sites de production.

PARAMÈTRES RÉSEAU POUR DIFFÉRENTS TYPES D'APPLICATIONS

FONCTIONNALITÉ RÉSEAU	RADAR AUTOMOBILE	MACHINE-OUTIL	ÉQUIPEMENT AUDIO PROFESSIONNEL	VIDÉO GRAND PUBLIC
Echelle	4 capteurs	64 axes	20 haut-parleurs	1 écran
Bande passante	1 Gbit/s	100 Mbit/s	100 Mbit/s	100 Mbit/s
Gigue	20 ns	100 ns	10 ns	100 ms
Latence	1 ms	100 µs	10 µs	1 s
Durée de cycle	10 ms	< 1 ms	Flux	Salves
Synchronisation temporelle	Oui	Oui	Oui	Non
Topologie	En étoile	En ligne, en anneau	En étoile, en ligne	Point à point

En matière de systèmes de contrôle/commande, tels ceux qui équipent les voitures, les lignes de production ou les salles de concert, des délais dans la transmission de données, même rares, sont inacceptables. Deux critères se révèlent ici essentiels : la latence et la gigue, c'est-à-dire la variation de la latence des données de contrôle/commande échangées.

L'un des principaux défis d'une configuration réseau TSN réside dans le grand nombre de capteurs et d'actionneurs connectés que compte un système de commande industriel. TSN est toutefois capable de classer les flux et de leur attribuer un ordre déterministe de transfert sur le réseau. Idéalement, un réseau convergent héberge plusieurs classes de flux dans un domaine TSN. Mais avant de s'intéresser aux questions d'ingénierie réseau, il convient de se pencher sur les fonctions fondamentales de la technologie.

Principes de la technologie TSN

Le standard Ethernet défini par les normes IEEE 802, combiné au protocole IP, a connu un succès rare dans les industries technologiques. Seules des technologies plus sophistiquées en termes de déterminisme et de qualité de service telles que le protocole ATM (mode de transfert asynchrone), le Token Ring ou RapidIO sont parvenues à remettre un temps en cause son hégémonie. Dans le détail, TSN compte environ 12 normes IEEE 802 qui visent justement à intégrer ces mêmes qualités de déterminisme et de qualité de service au protocole Ethernet sans en amoindrir les atouts propres, notamment l'interopérabilité.

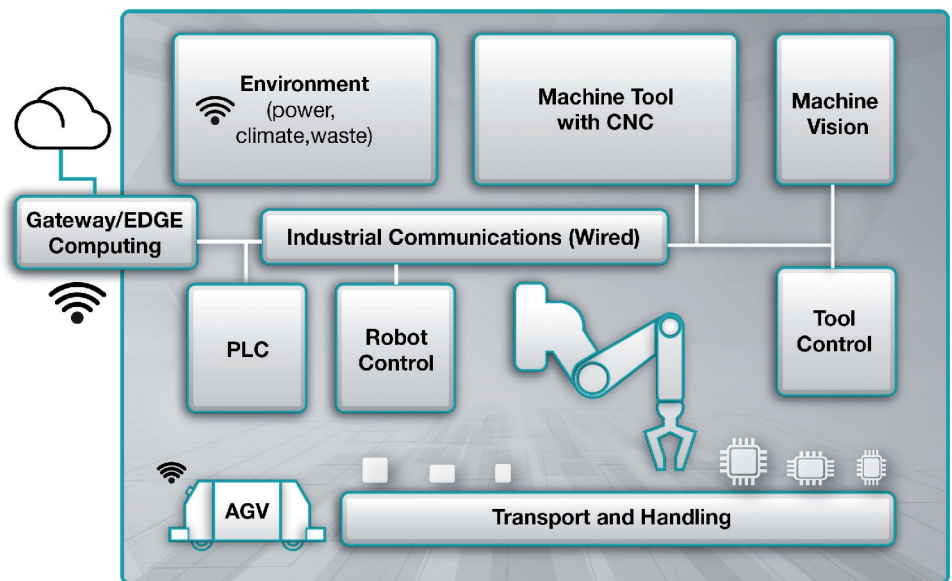
TSN est une solution adaptée aux réseaux locaux (LAN) qui peut fonctionner avec un réseau Ethernet non TSN, mais les exigences de délai ne sont garanties qu'au sein du réseau local TSN. Il est par ailleurs possible de combiner plusieurs normes TSN en fonction du cas d'usage ciblé afin de bénéficier d'une référence temporelle commune, d'une latence maximale garantie, ou encore de la coexistence avec un autre type de trafic ou avec des communications en arrière-plan.

Comme pour tout standard largement diffusé, la liste des spécifications TSN ne cesse d'évoluer. Certaines, comme l'IEEE 802.1AS-Rev, n'ont pas encore été approuvées ; d'autres sont continuellement étouffées. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire, au moment de choisir une solution, de vérifier qu'elle pourra être mise à jour pour se conformer aux normes nouvelles ou modifiées.

Comme le montre la figure 2, l'Ether-

1 ARCHITECTURE D'UNE CELLULE DE PRODUCTION DE L'INDUSTRIE 4.0 AVEC INFRASTRUCTURE DORSALE DE COMMUNICATION TSN

Dans les usines modernes, tous les systèmes de production sont connectés au sein d'un réseau Ethernet déterministe et temps réel. Dans ce cadre, un réseau critique au niveau temporel (Time-Sensitive Network) est une technologie clé pour interconnecter divers systèmes de commande en temps réel.



net défini par les normes IEEE 802 avec fonctionnalités TSN est une technologie de couche 2 (liaison de données). Les applications nécessitent un protocole de couche supérieure tel qu'UDP/IP ou PROFINET au-dessus de TSN.

● IEEE 802.1AS-Rev – Timing et synchronisation pour les applications critiques au niveau temporel

Dans un réseau où la transmission des paquets de données doit se faire de manière déterministe, il est nécessaire que les équipements partagent un référentiel de temps commun. L'horloge mère transmet l'heure dans des paquets Ethernet à tous les équipements connectés au réseau en appliquant l'algorithme BCMA (Best Master Clock Algorithm).

L'IEEE 802.1AS-Rev propose une synchronisation précise du temps via des paquets de données selon un profil ou sous-ensemble rigoureusement défini de la norme IEEE 1588v2. Cette version révisée de l'IEEE 802.1AS ajoute la prise en charge de plus d'un domaine temporel, ainsi que d'un processus en une étape, en plus du processus en deux étapes. Le matériel sous-jacent doit être en mesure de gérer l'horodatage des paquets transmis et reçus aussi près que possible du support physique. Si la notification du délai se fait en une étape, il doit pouvoir intégrer l'horod-

datage au sein d'un paquet. Si elle se fait en deux étapes, l'horodatage est transmis dans un paquet ultérieur, ce qui peut permettre de réduire la surcharge générée par la synchronisation des paquets de données.

L'IEEE 802.1AS-Rev traite également de la mesure du délai de transmission sur une ligne de pair-à-pair et du calcul du délai de transmission au niveau des ponts. Au-delà de l'horodatage, le reste du standard 802.1AS-Rev est généralement implémenté via du logiciel ou du micrologiciel exécutés sur un cœur de processeur alloué à cet effet. Les processeurs Sitara compatibles TSN de Texas Instruments (TI) respectent notamment l'IEEE 802.1AS. Sa révision 802.1AS-Rev et la procédure de notification du délai en une étape feront l'objet d'un kit de développement (SDK) ad hoc ultérieur.

● IEEE 802.1Qbv – Améliorations pour le trafic programmé

Grâce à la mise en forme du trafic en fonction du temps (TAS, Time-Aware Shaper), les commutateurs réseau peuvent tenir compte de la durée du cycle de la transmission temps réel. L'ordonnancement des paquets au niveau des ports de sortie crée une fenêtre temporelle durant laquelle aucun autre trafic potentiellement source de perturbations n'est possible. L'implémentation TSN sur les

processeurs Sitara de TI prend ainsi en charge le mécanisme TAS. Cette fonction est principalement assurée par le matériel, une pile logicielle assurant la configuration du mécanisme hardware au niveau de chaque port de pont et de chaque station source (talker).

● **IEEE 802.1Qbu – Prémption des trames et 802.3br – Trafic urgent intercalé**

Le réseau Ethernet fonctionne en mode différé (store-and-forward). Lorsque la transmission d'un paquet de données commence, le câble est réservé pour ce paquet jusqu'à la fin de l'opération. Ainsi, un réseau affi-

sions urgentes se voient accorder la priorité, bénéficiant ainsi d'une latence limitée.

La commutation en mode direct, la mise en forme du trafic TAS et la préemption des trames sont les principales technologies de réduction de la latence – même sur un vaste réseau à topologie chaînée. Toutes trois sont implémentées sur les processeurs Sitara compatibles TSN de TI.

● **IEEE 802.1Qch – Cycles de mise en file d'attente et d'acheminement**

Les cycles de mise en attente et d'acheminement permettent une organisation déterministe de tous les

Protocol) pour créer de nouveaux chemins au sein du réseau. Dans ces deux approches, le temps de transmission de la trame est variable.

TSN exploite la redondance pour limiter la latence, même en cas de pannes ponctuelles (câbles sectionnés, commutateurs défectueux, etc.). Ainsi, afin d'assurer de manière proactive la bonne transmission des trames au sein d'une topologie LAN comptant plusieurs chemins possibles, l'IEEE 802.1CB prescrit de les dupliquer de manière sélective à la source, puis d'éliminer les duplicatas au niveau de la destination.

L'IEEE 802.1CB est compatible avec les réseaux industriels existants dotés de protocoles de redondance plus anciens tels que HSR (High-Availability Seamless Redundancy) ou PRP (Parallel Redundancy Protocol), qui font déjà en sorte que les pannes ponctuelles n'aient pas d'effet sur la latence. Ces deux protocoles sont pris en charge par l'unité PRU-ICSS (unité programmable en temps réel et sous-système de communication industrielle) des processeurs Sitara. Une future version du kit de développement associé assurera la conformité à l'IEEE 802.1CB.

● **IEEE 802.1Qcc – Améliorations et performances du protocole de réservation de flux (SRP)**

TSN utilise trois numéros d'identification : l'identifiant du flux (Stream ID), son adresse de destination et la classe de trafic.

L'identifiant du flux correspond à l'adresse MAC (Media Access Control) de la source, accompagnée d'un descripteur de 16 bits.

L'adresse de destination du flux est l'adresse MAC de destination, associée à l'identifiant du réseau local virtuel VLAN (IEEE 802.1Q – prise en charge du VLAN). Ce sont généralement des adresses gérées localement ou des adresses de multicast.

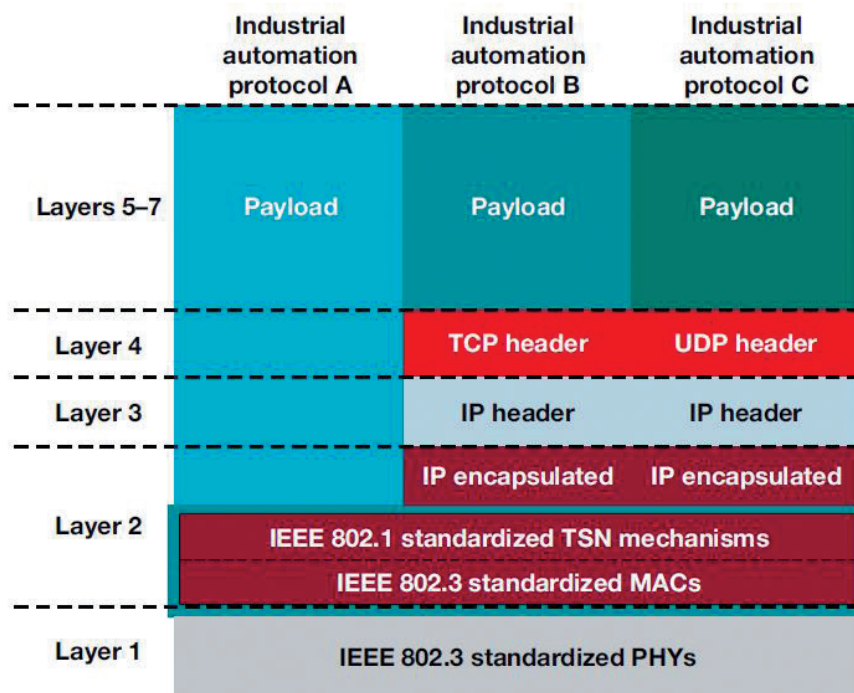
Les bits de priorité VLAN déterminent la classe de trafic (il existe généralement une ou deux classes seulement).

L'identifiant du flux est l'identifiant unique mis en œuvre par la gestion des ressources. L'adresse de destination du flux et la classe de trafic indiquent de leur côté le chemin emprunté par les données.

La norme IEEE 802.1Qcc décrit un modèle de configuration centralisé (figure 3) comportant une entité de

2 LES MÉCANISMES IEEE TSN AU SEIN DE LA PILE DE PROTOCOLES POUR AUTOMatismes INDUSTRIELS

L'Ethernet défini par les normes IEEE 802 avec fonctionnalités TSN est une technologie de couche 2 (liaison de données). Les applications nécessitent un protocole de couche supérieure tel qu'UDP/IP ou PROFINET au-dessus de TSN.



chant un débit de 100Mbit/s et une taille maximale de paquet de 1,5Ko crée un blocage en tête de ligne d'environ 120ms (1,5Ko/100Mbit/s). Il est possible de réduire ce délai de manière linéaire en utilisant des liaisons plus rapides, mais même un réseau de 1 Gbit/s peut afficher une gigue de plusieurs dizaines de microsecondes.

Pour limiter les blocages en tête de ligne, l'IEEE a défini le principe de préemption des trames (802.1Qbu) ainsi que celui, connexe, de trafic urgent intercalé sur la couche physique (802.3br). Seules les transmis-

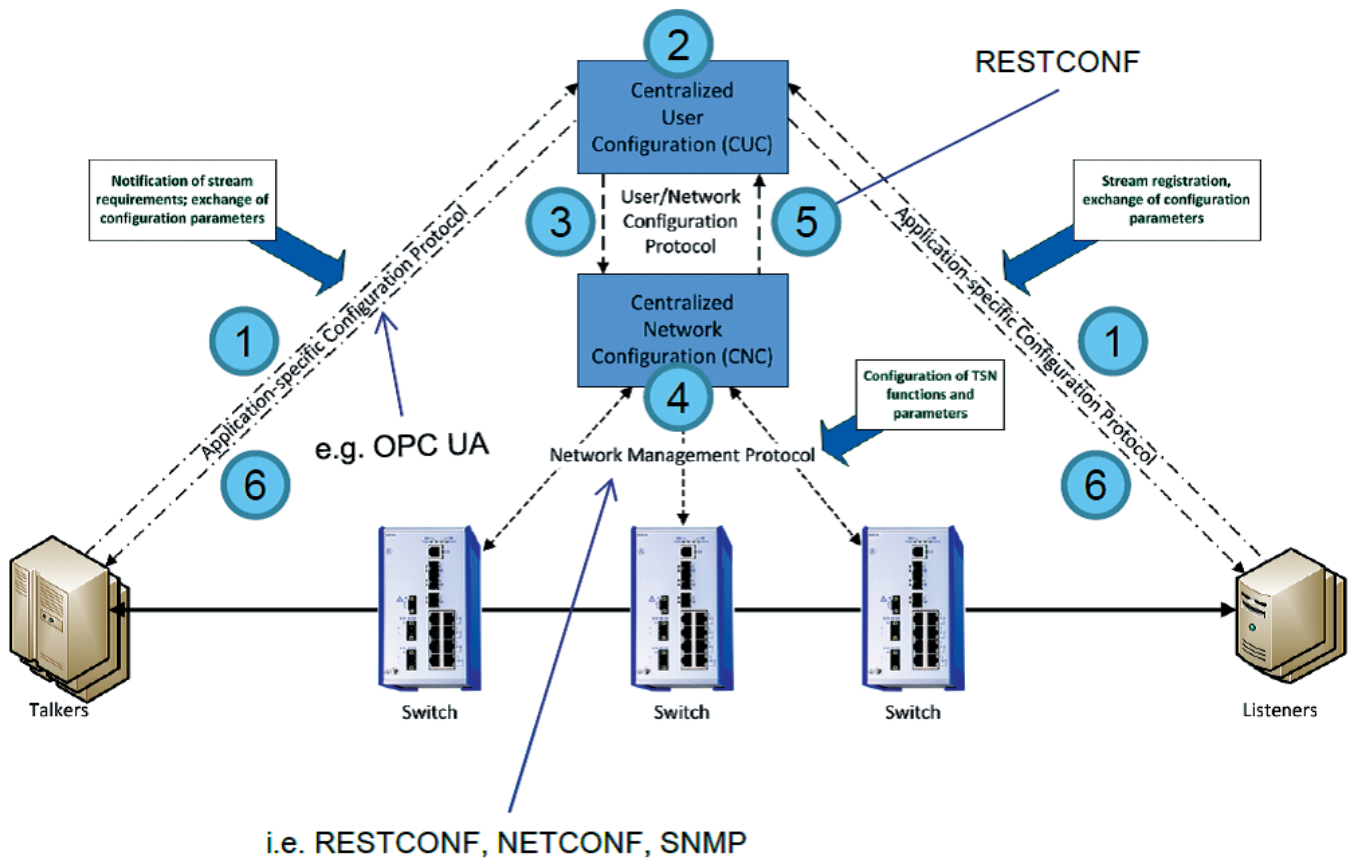
flux. Les processeurs Sitara de TI ne respectent pas l'IEEE 802.1Qch. À titre de remplacement, TI utilise la norme 802.Qbv (mise en forme du trafic en fonction du temps) associée à un réseau entièrement géré pour éviter les interférences.

● **IEEE 802.1CB – Réplication et élimination de trames pour assurer la fiabilité des flux**

Ordinairement, les réseaux Ethernet s'appuient sur des protocoles de niveau supérieur comme TCP (Transmission Control Protocol) pour retransmettre les trames Ethernet perdues, ou encore STP (Spanning Tree

3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU STANDARD TSN 802.1QCC POUR LA RÉSERVATION DE FLUX CENTRALISÉE

La norme IEEE 802.1Qcc décrit un modèle de configuration centralisé comportant une entité de configuration des utilisateurs (CUC, Centralized User Configuration). Une entité de configuration du réseau (CNC, Centralized Network Configuration) calcule de son côté l'attribution et la disponibilité des ressources, et configure les ponts.



configuration des utilisateurs (CUC, Centralized User Configuration). Une entité de configuration du réseau (CNC, Centralized Network Configuration) calcule de son côté l'attribution et la disponibilité des ressources, et configure les ponts.

Il existe toutefois d'autres types d'architectures. Dans certaines architectures, les stations source (talkers) et de destination (listeners) communiquent directement avec l'entité CNC; d'autres sont entièrement distribuées. On voit par ailleurs fréquemment des architectures centralisées et des protocoles de gestion réseau reposant sur YANG (un langage de modélisation de données développé par l'IETF et défini dans le RFC 7950), à l'instar des protocoles RESTCONF et NETCONF, utilisés au-dessus d'une pile réseau sécurisée standard telle que TLS (Transport Layer Security).

Impact de TSN sur l'Ethernet industriel

TSN associe des fonctionnalités temps réel à l'Ethernet standard tel que défini par l'IEEE, fonctionnalités

auparavant proposées exclusivement par des bus de terrain industriels spécialisés (également qualifiés d'Ethernet industriel). Cependant, TSN ne supprime pas la nécessité d'un protocole de couche supérieure, ni n'a vocation à le remplacer. Les interfaces avec le logiciel en sont un bon exemple. Ainsi, un socket BSD (Berkeley Software Distribution) constitue désormais l'interface de connexion standard pour le protocole TCP/IP et les réseaux en général. Sa portabilité et son échelonnabilité permettent de l'adapter à une large variété d'applications.

De son côté, le fonctionnement d'une application HTTP (Hypertext Transfer Protocol) reste le même, que la lecture se fasse à partir d'un fichier local ou via Internet. Cependant, ces sockets ne sont pas nécessairement des interfaces pertinentes pour un protocole qui priorise la latence dans les pires cas de figure et maintient une référence temporelle commune jusqu'à l'application. Par exemple, le protocole Ethernet industriel PROFINET s'attend à ce qu'un Ethernet

compatible TSN soit juste une couche de liaison de données sur laquelle s'exécute.

Le standard TSN de l'IEEE définit en pratique les fonctions de couche 2 et de commutation de niveau LAN (référence temporelle comprise), mais il ne définit pas l'interface logicielle qui permet de configurer ces fonctionnalités matérielles. Par conséquent, le logiciel de gestion d'un commutateur fourni par un équipementier A devra passer par une interface de programmation applicative (API) pour se connecter à une autre API d'un fournisseur B. Autres points, peut-être plus spécifiques, qui ne sont pas traités par les spécifications de l'IEEE : la latence et la gigue liés au chemin de données logiciel. Comme mentionné plus haut, les anciens sockets sont très utiles, mais absolument pas pensés pour traiter les problèmes de transmission en temps réel ou de latence. Il est très probable que les API et l'architecture logicielle qui encadrent les chemins de données sur les réseaux TSN évoluent dans le temps.

C'est pourquoi la solution TSN programmable reposant sur une unité PRU-ICSS permet de gérer de manière incrémentale la portion logicielle de la latence ainsi que la configuration et la gestion. Cette solution TSN peut être adaptée à une architecture logicielle nécessitant un mécanisme très spécifique de mise en mémoire tampon pour le traitement en temps réel, tout en prenant en charge la pile réseau Linux Mainline en parallèle. Et à mesure que de nouvelles fonctionnalités temps réel seront intégrées à Linux, il sera possible d'ajuster la solution. Dans ce cadre, TI travaille au sein du groupe Linaro à renforcer le déterminisme et à proposer une API de

mémoire tampon directe de couche 2 pour les données des « consommateurs » et des « fournisseurs ». Tous deux sont compatibles avec la couche de commutation TSN et peuvent profiter des améliorations liées au traitement en temps réel. La standardisation des protocoles de redondance par l'IEEE n'est toutefois pas encore terminée. Il reste à déterminer si l'IEEE 802.1CB remplacera ceux de PROFINET et d'EtherNet/IP, à savoir MRP (Media Redundancy Protocol) et DLR (Device Level Ring). Quoi qu'il en soit, la transition entre un ancien protocole de communication industriel et un nouveau prend généralement plusieurs années. Au cours de cette période intermédiaire,

- une passerelle entre le niveau terrain (contrôleur) et le niveau commande (appareil);
- une passerelle entre le maître IO-Link et le réseau TSN;
- la liaison et l'intégration objet au sein d'une architecture OPC UA via des interfaces entre TSN et le cloud reposant sur l'Ethernet filaire et sans fil;
- une combinaison de protocoles au niveau terrain et au niveau commande, associée à une liaison montante avec le cloud.

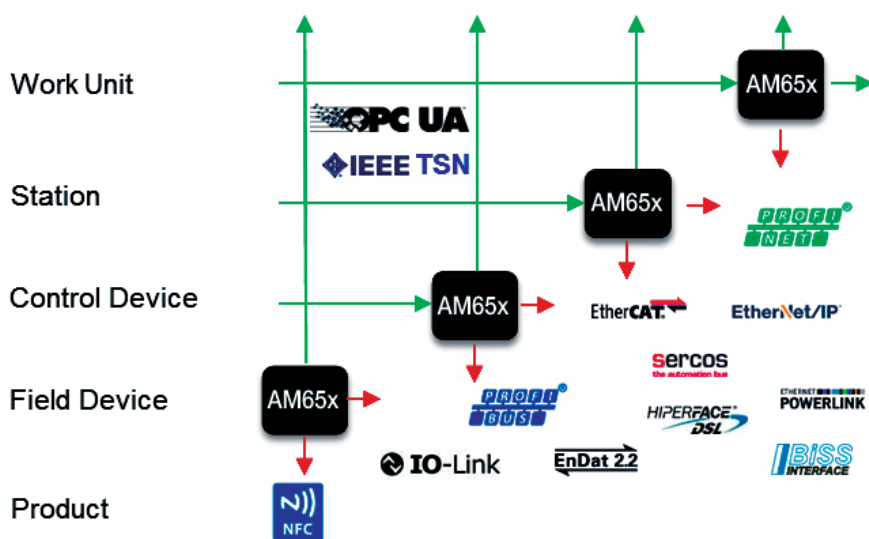
Les processeurs Sitara AM57x sont en mesure d'assurer toutes les fonctions de passerelle citées ci-dessus. Grâce à leurs deux sous-systèmes de communication industrielle (PRU-ICSS), à un commutateur Gigabit supplémentaire et à leur capacité de communiquer avec un module Wi-Fi, ils peuvent prendre en charge jusqu'à sept canaux d'échange de données à partir d'un seul composant. Chaque unité PRU-ICSS peut implémenter des protocoles Ethernet industriels côté contrôleur ou côté équipement à commander. Avec les processeurs Sitara AM65x, cette prise en charge peut être étendue à un débit de données de l'ordre du gigabit grâce à trois unités PRU-ICSS au maximum.

Conclusion

TSN évolue aujourd'hui de manière à proposer une riche gamme de fonctionnalités de transmission de paquets de données à travers un vaste réseau industriel, tout en assurant une latence garantie. Les entreprises leaders en matière d'Ethernet industriel ne s'y trompent pas et adoptent d'ores et déjà cette technologie pour l'intégrer à leurs systèmes d'ingénierie et à leurs profils d'applications existants. Les systèmes de contrôle/commande de niveau plus élevé et autres applications extérieures à l'usine peuvent également exploiter des outils de configuration réseau centralisés indépendants de l'application. TSN n'est de toute façon pas limité à un débit de 100Mbit/s; il fonctionne également avec des infrastructures Gigabit Ethernet. Grâce aux produits Sitara AM57x et AM65x dotés de commutateurs TSN intégrés dans le silicium, il est ainsi possible d'accélérer la transition vers l'Ethernet industriel à 1 Gbit/s.

4 LES RÔLES DES PASSERELLES DE L'INDUSTRIE 4.0 DANS UN SYSTÈME DE PRODUCTION COMPATIBLE TSN

Avec TSN, il est possible de déployer diverses options de passerelles à différents niveaux d'un système de production. Dans ce cadre, le kit de développement industriel TI AM65x offre par exemple six ports Gigabit Ethernet temps réel, un port Gigabit Ethernet supplémentaire et une interface PCIe 3.0 assurant la qualité de service sur 4 canaux virtuels.



configuration open source pour le matériel TSN.

A noter que les protocoles Ethernet industriel tels que PROFINET et EtherNet/IP utilisent déjà le pont à apprentissage (learning bridge) Ethernet défini par l'IEEE comme technologie de commutation sous-jacente. Ces protocoles peuvent désormais s'appuyer sur l'extension TAS et la préemption des trames pour mettre à profit des équipements TSN pour l'Ethernet industriel. Si EtherNet/IP utilise des paquets UDP (User Datagram Protocol) pour l'échange des données, PROFINET de son côté adopte un modèle de mise en

les deux seront utilisés simultanément sur les systèmes de production. Dans ce cadre, des fonctions de passerelle reliant ces deux générations de protocoles vont accélérer l'adoption des matériels TSN pour la communication industrielle. On peut notamment citer:

- les passerelles entre bus de terrain hérités (DeviceNet, PROFIBUS) et nouveaux protocoles Ethernet (EtherNet/IP avec TSN, PROFINET avec TSN);
- l'Ethernet industriel, qui ne peut pas fonctionner avec TSN au sein d'un même réseau (EtherCAT, SERCOS III);