

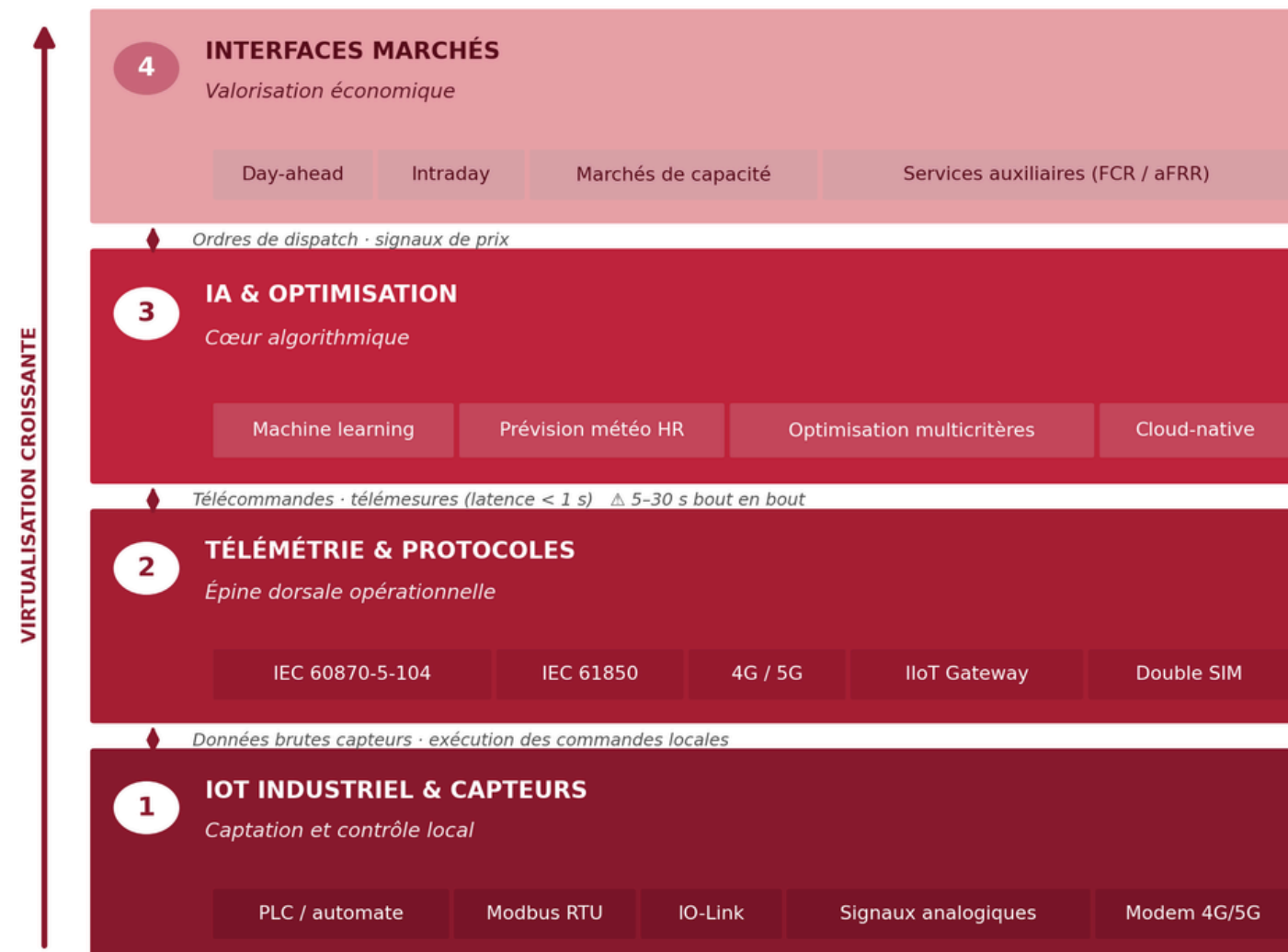
## VPP : Un millefeuille technologique au service de l'intégration des renouvelables

Marc Germanangue, Directeur Général Zenon

La gestion en temps réel par une VPP de centaines de milliers d'actifs énergétiques dispersés impose une architecture logicielle stratifiée. Cette complexité n'est pas fortuite : elle est la conséquence directe de la transition énergétique. Plus les EnR intermittentes et distribuées progressent, plus il devient nécessaire de coordonner des ressources hétérogènes pour maintenir l'équilibre du réseau.

L'architecture standard d'une plateforme VPP repose sur quatre strates interdépendantes : matérielle (IoT et capteurs), communication (protocoles et réseaux), applicative (optimisation algorithmique) et marchés (interfaces avec les bourses de l'électricité). Cette séparation permet la modularité (un agrégateur peut remplacer ses boîtiers IoT sans réécrire ses algorithmes), mais chaque couche constitue aussi un point de défaillance potentiel.

### Architecture technologique d'une VPP



D'après : Kolenc et al., MDPI Energies (2019) ; Singh et al., Scientific Reports (2025) ; Next Kraftwerke ; Kraken Technologies (2025) ; Mercury Consortium (EPRI x Kraken, 2024)

Sources complémentaires : MDPI VPP Architecture 2019 — Consortium Mercury / EPRI — Nature — VPP Cybersecurity 2025

#### Couche 1. Captation locale

Au niveau des actifs décentralisés, des dispositifs IoT (internet des objets) industriels assurent la collecte de données et l'exécution de commandes. La Next Box de Next Kraftwerke illustre cette couche : un automate programmable traite et chiffre les données brutes des équipements et un modem 4G/5G établit la connexion sécurisée vers le système central. Ces boîtiers doivent satisfaire des contraintes contradictoires (robustesse industrielle, faible consommation, sécurité renforcée) et supporter simultanément plusieurs protocoles propriétaires.

#### Couche 2. Protocoles de télémetrie

La communication bidirectionnelle entre les actifs décentralisés et la plateforme centrale repose sur plusieurs standards industriels. Le protocole historiquement utilisé dans les systèmes SCADA et le nouveau standard à la modélisation orientée objet, constituent les deux référentiels dominants avec des compromis différents en matière de flexibilité et de sécurité. Ces protocoles TCP/IP permettent l'échange de télécommandes et de télémesures avec des latences inférieures à la seconde. La redondance des liens (double SIM, basculement automatique) devient critique : une VPP de 2 GW perdant sa connexion pendant 10 mn lors d'un pic de demande peut compromettre l'équilibre du réseau.

#### Couche 3. IA et optimisation

Le cœur technologique réside dans les algorithmes d'optimisation multicritères et les modèles prédictifs par apprentissage automatique. La plateforme Kraken gère plus de 70 millions de comptes et traite quotidiennement 15 milliards de points de données. Ses modules de machine learning intègrent prévisions météorologiques, modèles de prédiction de la demande et signaux de prix dynamiques pour résoudre un problème combinatoire complexe : maximiser les revenus de l'agrégateur tout en respectant les contraintes individuelles des propriétaires d'actifs (ex : véhicule électrique rechargé à 80 % pour 7 h du matin), les obligations contractuelles envers les opérateurs de réseau, et la maximisation de l'autoconsommation renouvelable réduisant d'autant le « curtailment » (écrêtement ou effacement de production) des surplus solaires et éoliens.

#### Couche 4. Interfaçage avec les marchés électriques

La valorisation économique d'une VPP s'effectue via des API connectées aux bourses de l'électricité. Une VPP participe typiquement à trois types de marchés simultanément : marchés day-ahead et intraday, marchés de capacité, et marchés de services auxiliaires (réglage de fréquence, réserves tournantes). L'intégration réglementaire est un défi majeur (règles d'enchères, tailles minimales de lots, pénalités d'indisponibilité).

#### Trois limites structurelles

Trois obstacles freinent la scalabilité des VPP — et par conséquent leur capacité à accompagner la montée en puissance des EnR. La latence entre la détection d'un événement réseau et l'exécution de la réponse agrégée reste de 5 à 30 secondes, ce qui est insuffisant pour certains services de stabilité rapide. L'hétérogénéité des protocoles IoT impose des coûts d'intégration élevés : pour les réduire, le consortium Mercury, cofondé par Kraken et l'EPRI, vise à établir un « Bluetooth de l'énergie » en standardisant la communication entre équipements et plateformes. Enfin, la cybersécurité est le talon d'Achille des systèmes distribués : les VPP sont exposées à des attaques par injection de fausses données susceptibles de manipuler les signaux de prix et de déstabiliser simultanément des milliers d'actifs. Le deep learning pourrait faciliter la détection de ces attaques. Lever ces trois verrous conditionne directement la capacité des VPP à devenir un pilier opérationnel de l'intégration des renouvelables.