



Retour d'expérience sur l'exploitation de stockages thermiques

Exemples mis en œuvre sur Limeil-Brévannes et Brétigny-sur-Orge

Journée technique du CIBE du 20 novembre 2024 – version 2

Jean-Marc Bertrand, Responsable Technique de Territoire IDF Réseaux - Engie Solutions France

Restreint

Interne

Externe

Confidentiel

Retour d'expérience en IDF - Contexte

La **Direction Régionale IDF Sud & Est Réseaux (Confluences)** a repris dans le cadre de la nouvelle organisation d'Engie Solution France mise en œuvre depuis le 1^{er} juillet 2024, **trois « mini-réseaux » de chaleur utilisant le bois énergie (ou biomasse) avec du stockage thermique** (aussi appelé hydroaccumulation ou hydroaccumulateur).

- Site de **Bondoufle** (deux chaudières Compte-R, 900 kW utiles + 800 kW utiles)
- Site de **Brétigny-sur-Orge** (deux chaudières Compte-R 4 MW utiles (4,65 MW PCI) bois plaquettes + 1 MW utiles bois granulés (été) + appoint-secours gaz (ou pour l'été, suivant prix du gaz et du granulés, et taux ENR à respecter à minima).
- Site de **Limeil-Brévannes** (une chaudière Agroforst 3 MW utiles + deux chaudières gaz naturel)

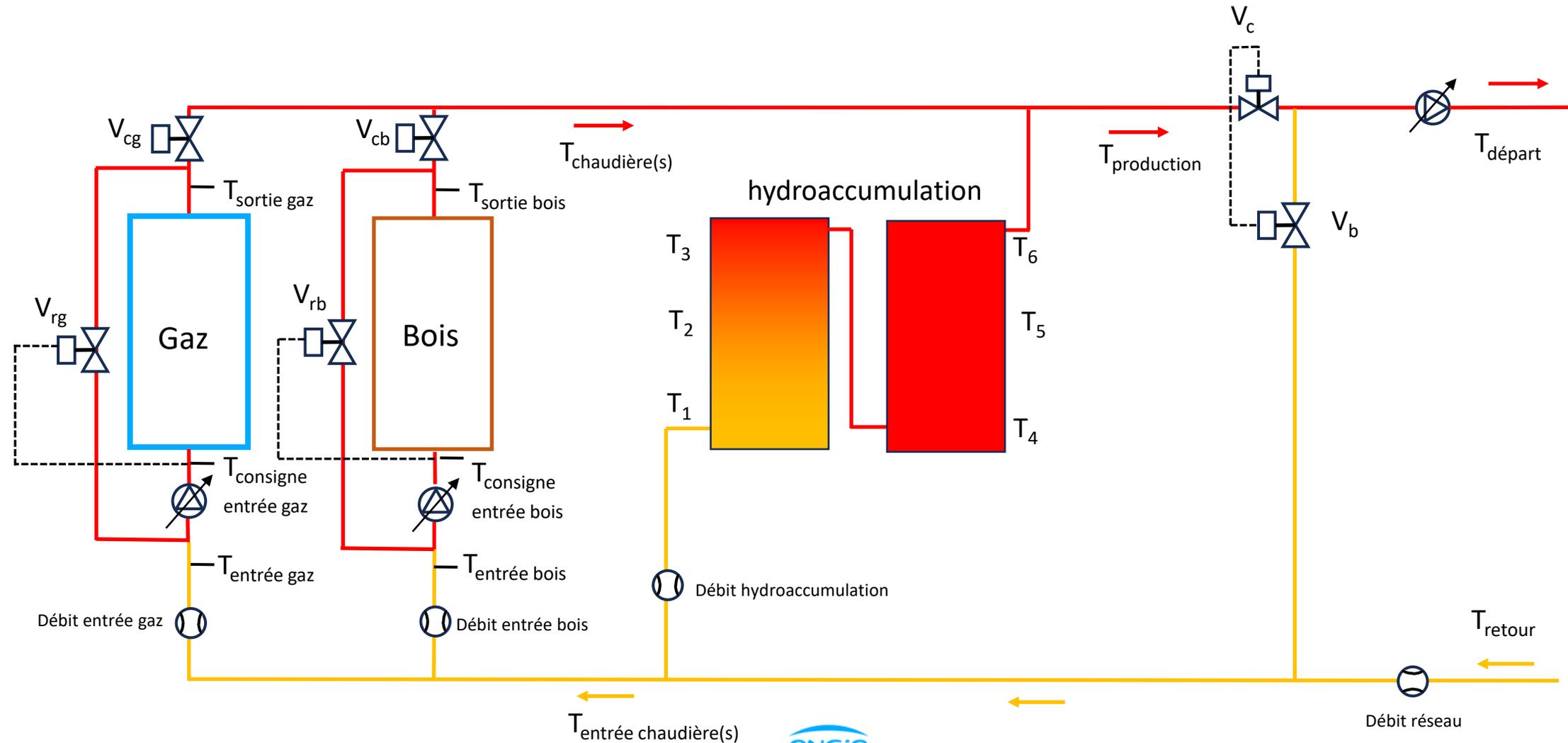
Le présent REX va concerner les sites de Brétigny et Limeil, car les deux fonctionnent de façon similaire, malgré quelques différences de conception hydraulique.

REX de Brétigny-sur-Orge et Limeil-Brévannes

- Historiquement **Brétigny-sur-Orge (OROBIA)** a été réalisé en premier, avec **deux stockages thermiques de 35 m³ chacun** (conçus et construits par Charot ; <https://www.charot.com>), montés en série, et l'ensemble connecté en parallèle des chaudières bois et du gaz).
- **Limeil-Brévannes** a été réalisé quasiment à la suite de Brétigny-sur-Orge, avec **un seul stockage thermique de 80 m³**. L'hydroaccumulateur (conçu et livré par Beireins, construit par 2CT), connecté en parallèle de la chaudière bois et du gaz.
- Initialement, l'**hydroaccumulation de Limeil-Brévannes ne fonctionnait pas de façon performante**, pour des **raisons d'hydraulique chaufferie** (et particulièrement celle des chaudières gaz), **et de paramétrage du programme cascade chaudières et régulation**, qui ne tirait pas profit de l'hydroaccumulateur de façon satisfaisante.
- **Il a été utilisé le retour d'expérience de Brétigny-sur-Orge pour améliorer le fonctionnement de Limeil-Brévannes**, et les résultats au niveau hydroaccumulation sont devenus nettement plus performants.

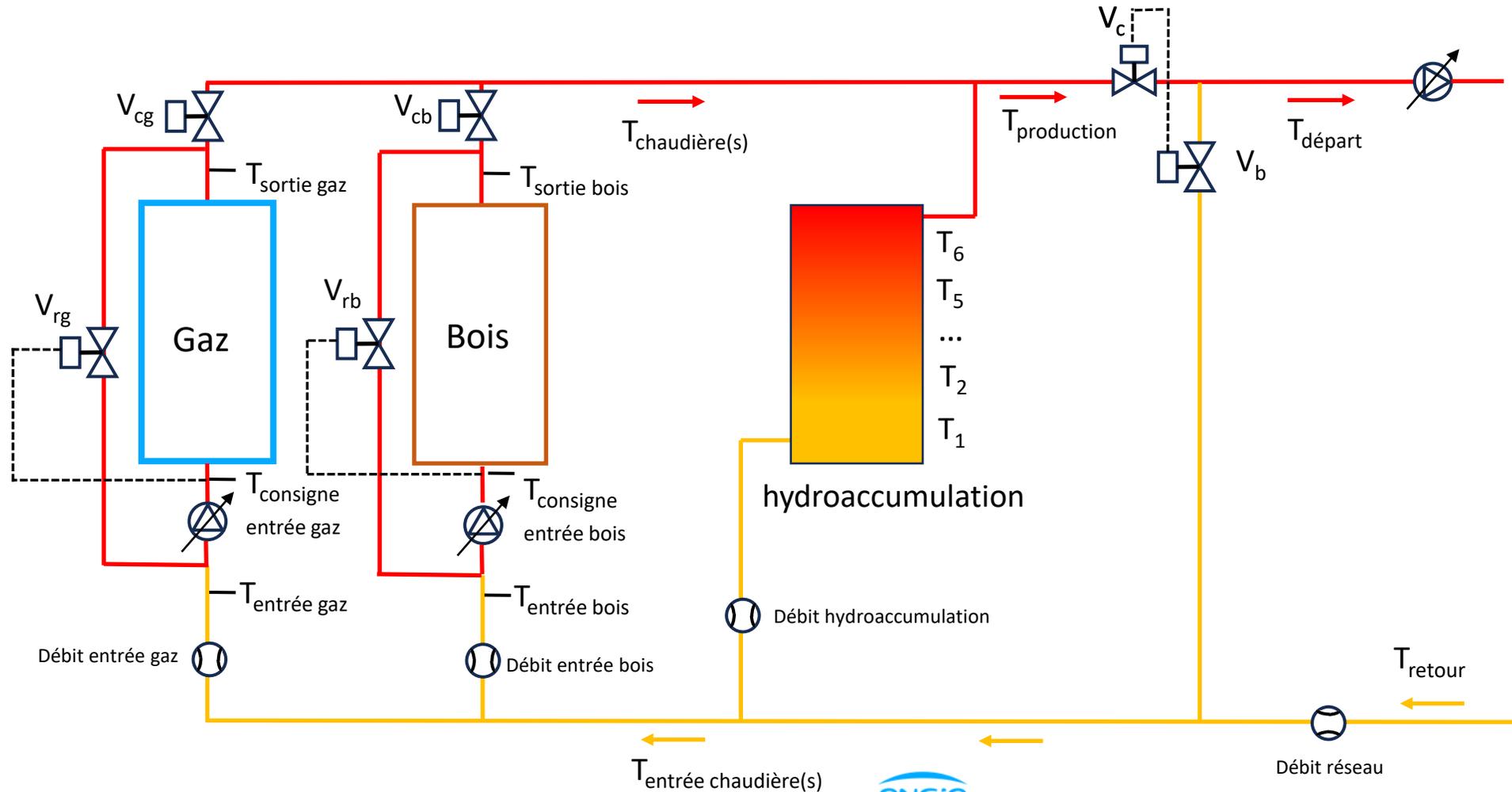
REX de Brétigny-sur-Orge et Limeil-Brévannes

Schéma simplifié de Brétigny-sur-Orge



REX de Brétigny-sur-Orge et Limeil-Brévannes

Schéma simplifié de Limeil-Brévannes



Fonctionnement de l'hydroaccumulation

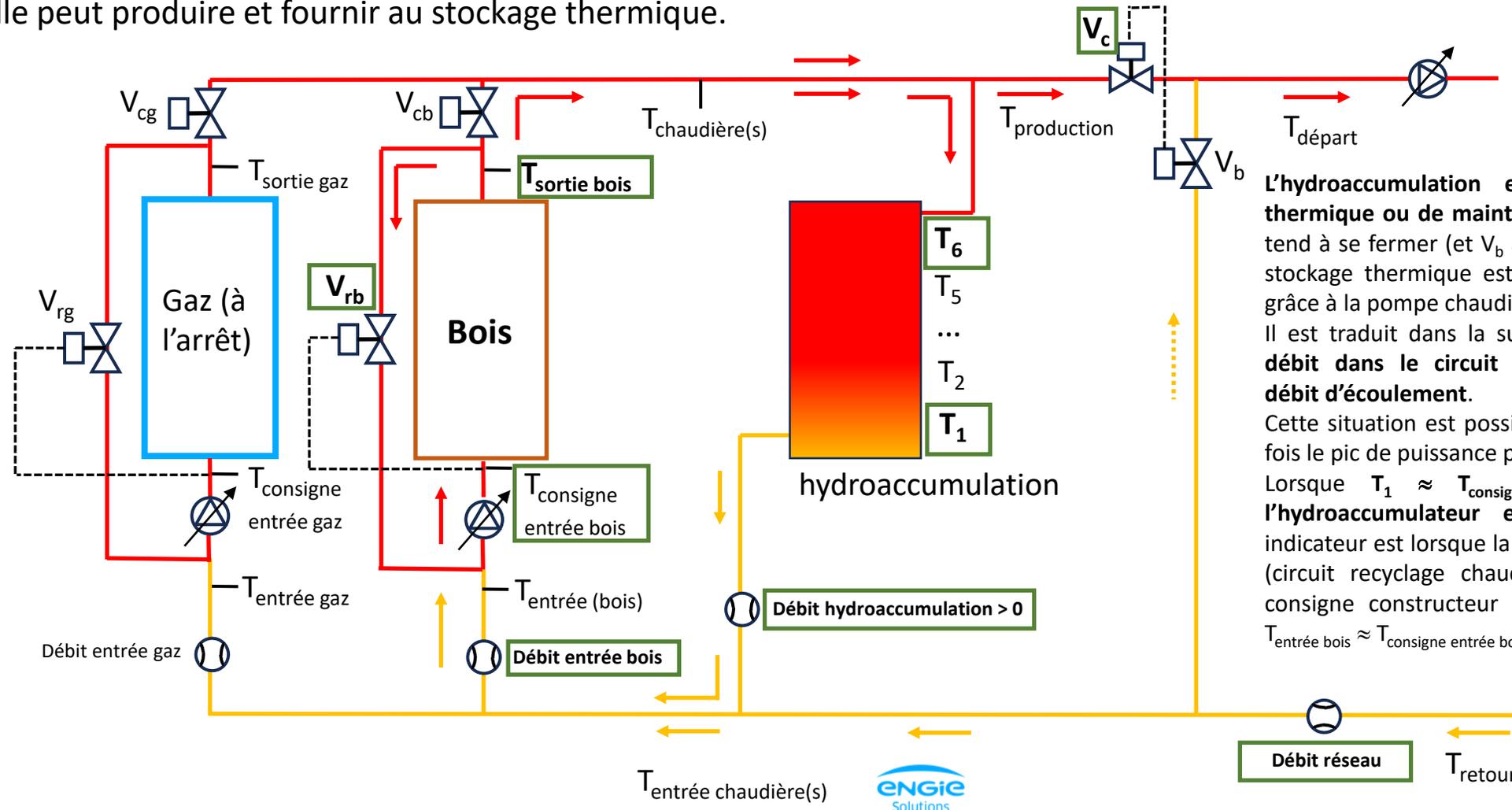
La mise en décharge ou en recharge thermique de l'hydroaccumulateur s'effectue en fonction de la demande du réseau, combinée à la capacité disponible via la chaudière biomasse, qui est l'énergie à utiliser et maximiser en priorité.

Cela peut se résumer à 3 situations principales :

- **Situation 1** : la chaudière bois est à même de fournir plus que la demande du réseau → elle peut ainsi contribuer à la recharge de l'hydroaccumulateur et à son maintien. Il n'y a pas de pic de puissance ou d'appel de puissance réseau sollicitant la décharge de l'hydroaccumulateur dans cette situation 1.
- Une situation « 1bis » est celle où la biomasse est à sa puissance maximale (appelé aussi puissance nominale) et que cette puissance est égale à la demande du réseau → l'hydroaccumulation est chargée, et si la demande du réseau augmente encore elle pourra ainsi être utilisée, sans avoir à démarrer le gaz en appoint.
- **Situation 2** : la puissance demandée par le réseau augmente, la chaudière bois continue à fonctionner à son nominal, l'hydroaccumulateur est alors utilisé pour compléter le pic de puissance. Une fois le pic de puissance passé, retour à la situation précédente, dans le cas contraire la situation 3 ci-après surviendra.
- **Situation 3** : si la puissance demandée augmente encore, et que l'hydroaccumulateur + la chaudière biomasse ne peuvent plus tenir la consigne de T° départ réseau, l'appoint gaz sera alors utilisé en ultime recours pour permettre de passer le pic de puissance demandée par le réseau. Le gaz pourra également contribuer le cas échéant à recharger thermiquement l'hydroaccumulateur. **L'enjeu au niveau performance énergétique est de minimiser la durée de cette situation 3** (sauf bien sûr en cas d'arrêt ou indisponibilité de la biomasse, où alors le gaz reste la seule énergie de production disponible).

Sur le schéma de Limeil-Brévannes :

Schématiquement, un **débit chaudière(s) > débit réseau**, traduit un **besoin inférieur du réseau par rapport à ce que peut fournir la biomasse** → cette situation permet de **recharger ou maintenir l'hydroaccumulateur**, la biomasse ayant ainsi une réserve de puissance qu'elle peut produire et fournir au stockage thermique.



L'hydroaccumulation est ici en situation de recharge thermique ou de maintien de sa charge. Lorsque la vanne V_c tend à se fermer (et V_b à s'ouvrir), le passage de débit dans le stockage thermique est favorisé pour recharge ou maintien, grâce à la pompe chaudière.

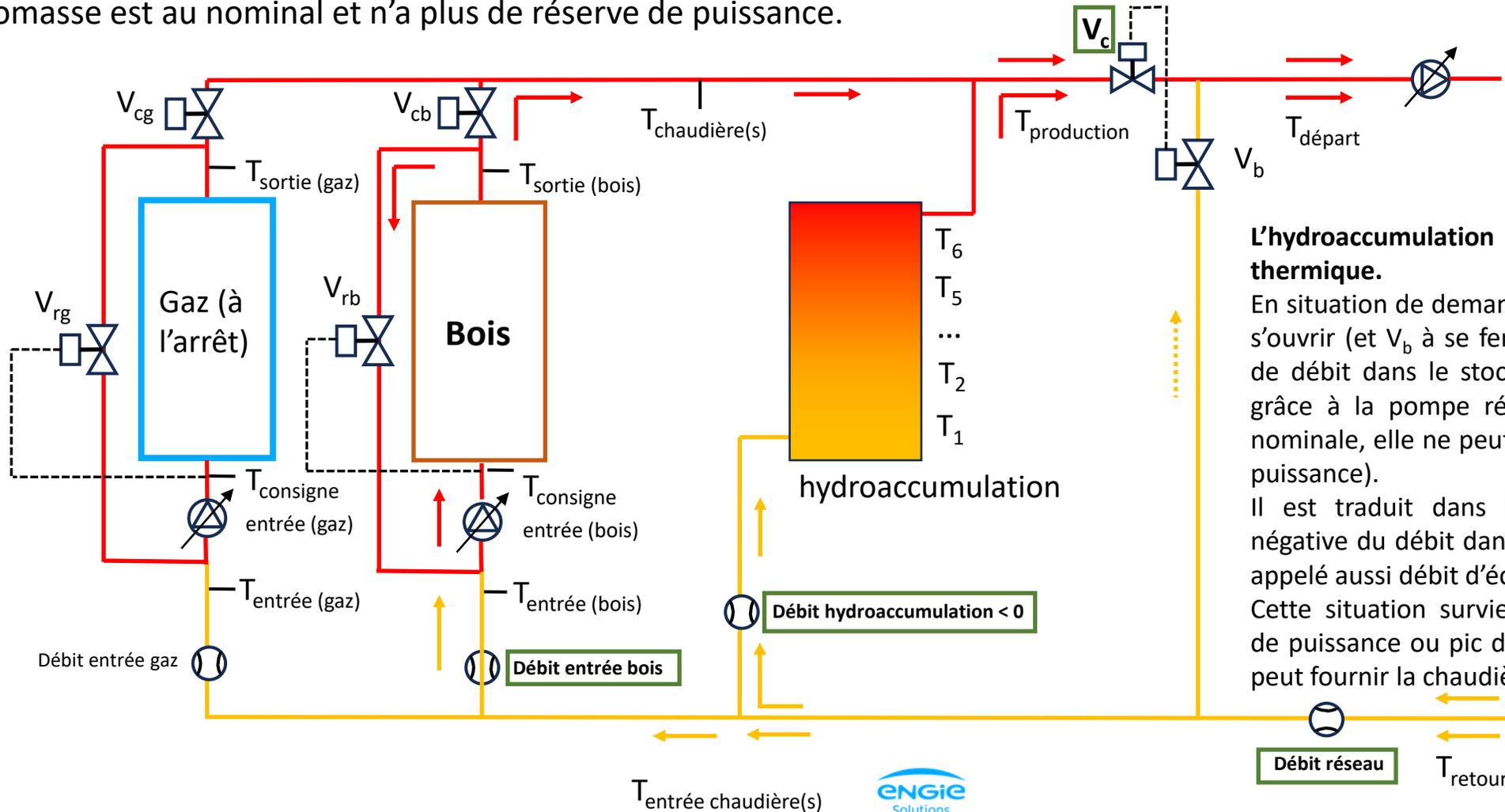
Il est traduit dans la supervision par une valeur positive du débit dans le circuit d'hydroaccumulation, appelée aussi débit d'écoulement.

Cette situation est possible avant un pic de puissance ou une fois le pic de puissance passé.

Lorsque $T_1 \approx T_{consigne\ entrée\ bois}$ et $T_6 \approx T_{sortie\ bois}$ l'hydroaccumulateur est considéré comme chargé. Un indicateur est lorsque la vanne V_{rb} se ferme et/ou reste fermée (circuit recyclage chaudière bois, nécessaire pour tenir la consigne constructeur T° entrée chaudière bois), car alors $T_{entrée\ bois} \approx T_{consigne\ entrée\ bois}$, plus besoin de recyclage.

Sur le schéma de Limeil-Brévannes :

Dans le cas inverse, un débit réseau > débit chaudière(s), cela traduit un besoin supérieur du réseau par rapport à ce que peut fournir la biomasse → cette situation permet de décharger et ainsi puiser dans l'énergie disponible dans l'hydroaccumulateur, la biomasse est au nominal et n'a plus de réserve de puissance.



L'hydroaccumulation est ici en situation de décharge thermique.

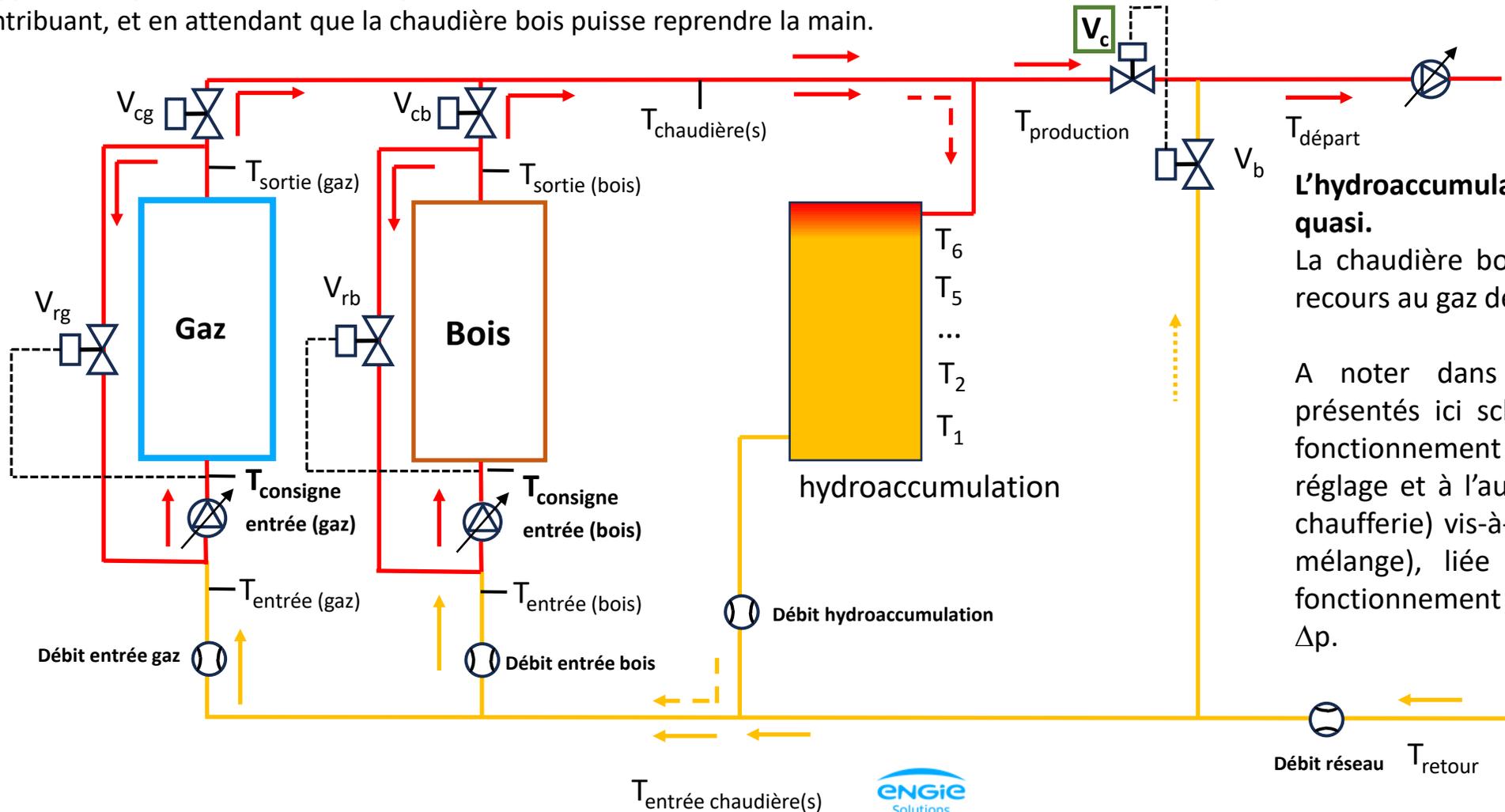
En situation de demande du réseau, la vanne V_c tend à s'ouvrir (et V_b à se fermer), ce qui favorise le passage de débit dans le stockage thermique pour décharge, grâce à la pompe réseau (la chaudière bois est au nominale, elle ne peut plus donner plus en débit et en puissance).

Il est traduit dans la supervision par une valeur négative du débit dans le circuit d'hydroaccumulation, appelé aussi débit d'écoulement.

Cette situation survient en situation d'augmentation de puissance ou pic de puissance supérieure à ce que peut fournir la chaudière bois.

Sur le schéma de Limeil-Brévannes :

Dans cette situation, la **demande réseau dans la durée reste supérieure à ce que peut fournir la chaudière biomasse et l'hydroaccumulation ne dispose plus ou quasi plus de capacité de déstockage thermique. Le gaz naturel est alors utilisé en appoint.** L'enjeu est alors de trouver un compromis entre son rôle d'apporter la puissance nécessaire pour suivre la demande réseau, mais aussi reconstituer une marge de manœuvre dans le stockage thermique, en y contribuant, et en attendant que la chaudière bois puisse reprendre la main.



L'hydroaccumulation est ici déchargée ou quasi.

La chaudière bois étant déjà au nominal, le recours au gaz devient nécessaire.

A noter dans l'ensemble des exemples présentés ici schématiquement, que le bon fonctionnement de l'ensemble est lié au bon réglage et à l'autorité de la vanne V_c (vanne chaufferie) vis-à-vis de la V_b (vanne bipasse - mélange), liée à la préservation du bon fonctionnement du réseau au niveau de son Δp .

Fonctionnement de l'hydroaccumulation

Le choix des conditions pour avoir recours au gaz naturel sont cruciales, pour viser à minimiser autant que possible le recours à cette énergie d'appoint carbonée.

En effet, dans cette situation le gaz peut être amené à contribuer à la recharge thermique de l'hydroaccumulation, pour reconstituer une marge de manœuvre ou de sécurité de conduite via ce stockage.

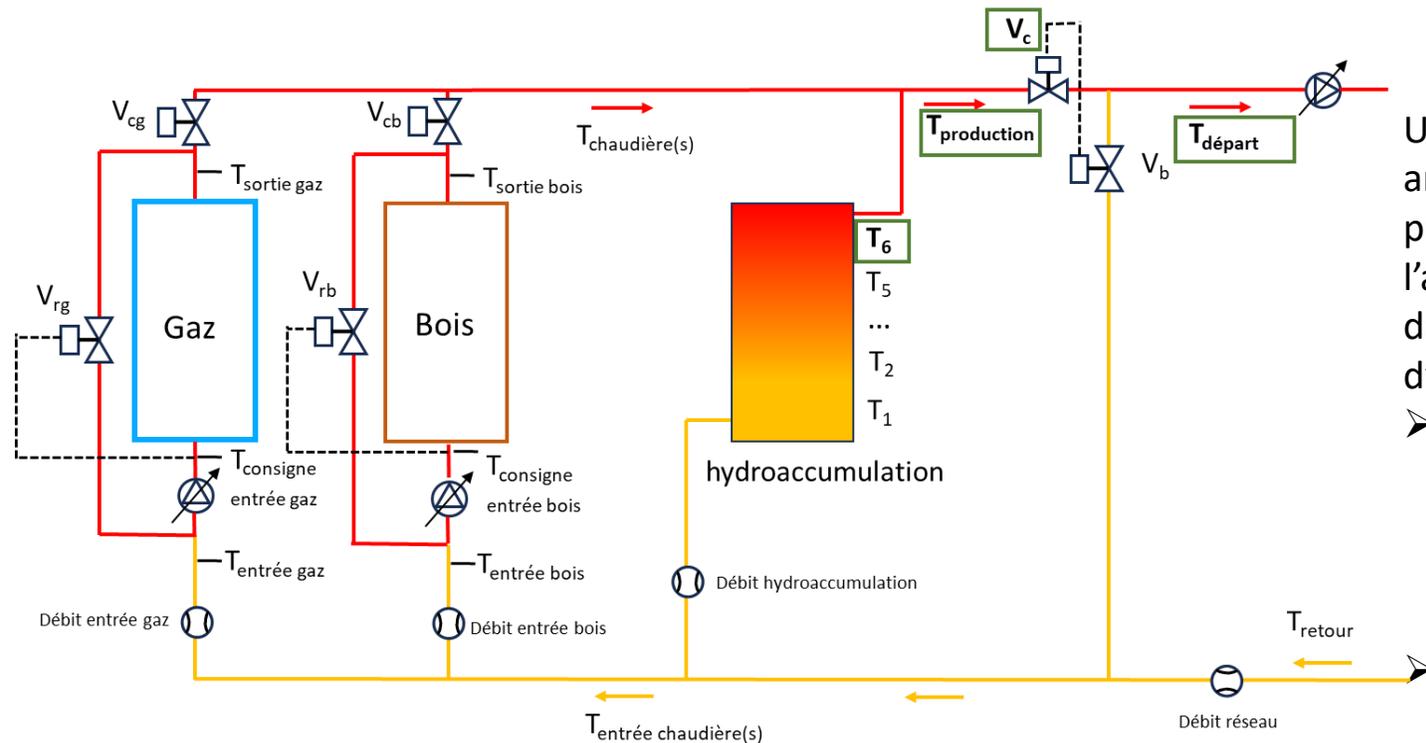
L'utilisation du **gaz offre une flexibilité de fonctionnement** (démarrages – arrêts, rapidité de modulation de puissance) bien plus importante qu'une chaudière bois, ce qui offre la possibilité de son utilisation à bon escient. **Néanmoins, arrêter – démarrer une chaudière gaz est aussi une dépense d'énergie électrique** (cycle préventilation par exemple).

Mais l'enjeu reste que le fonctionnement du gaz ne se fasse pas au détriment :

- d'une part de la chaudière bois,
- et d'autre part de l'hydroaccumulateur, qu'il est plus énergétiquement vertueux de recharger via la chaleur apportée par la chaudière biomasse ou de décharger dans un mode de fonctionnement chaudière biomasse + hydroaccumulation.

Exemple de choix de conditions pour le recours au gaz

Schéma simplifié de Limeil-Brévannes



↳ **En cas d'arrêt imprévu de la bois** → les conditions ici présentées ne s'appliquent plus, le démarrage du gaz se fait, car la situation n'est plus un besoin d'appoint, mais de secours ou d'appoint-secours de la production.

Il peut par exemple être opté de devoir atteindre des conditions en même temps pour finalement vraiment déclencher l'allumage de l'appoint gaz :

➤ $T_{production\ mesurée} < T_{départ\ (consigne)}$ → Situation où la production commence à avoir du mal à assurer la demande du réseau de distribution.

Un réseau ayant de l'inertie, ou l'hydroaccumulation pouvant arriver à épuisement mais que la fin du pic de puissance va être passé, et que la bois va du coup pouvoir reprendre la main sans l'aide de l'hydroaccumulateur, un écart de tolérance peut être mis dans la condition $T_{départ\ (consigne)}$ et/ou une temporisation avant d'enclencher la condition comme étant effectivement atteinte.

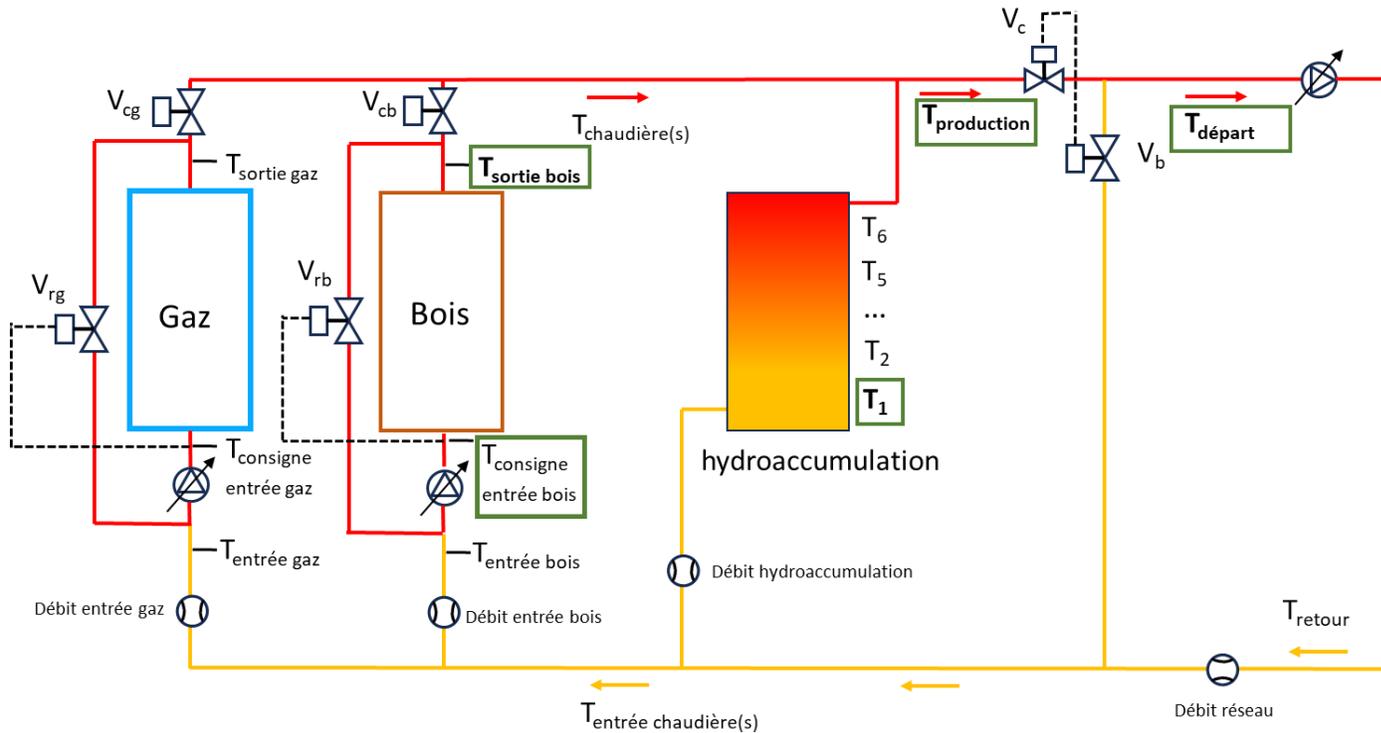
➤ $T_6 < T_{départ\ (consigne)}$ → De plus, signe que l'hydroaccumulateur va avoir du mal à fournir la température demandée par le réseau. Il ne va plus pouvoir fonctionner en parallèle avec la chaudière bois. Il peut aussi être opté pour mettre la condition sur T_5 plutôt que T_6 .

$V_c >$ à un certain % d'ouverture → Enfin la demande d'ouverture de la vanne de production chaufferie devient telle qu'il n'y a plus ou quasiment plus de marge de manœuvre.

⇒ **Lorsque ces conditions sont présentes en même temps dans la supervision** → **démarrage automatique de la chaudière gaz.**

Exemple de choix de conditions pour arrêter le gaz

Schéma simplifié de Limeil-Brévannes



⇒ **Tout cela dépend** d'une part de la conception de l'outil de supervision et de sa paramétrabilité (elle-même lié à la conception du process), et d'autre part **de l'expérience, REX et savoir-faire de l'exploitant !**

Il peut par exemple être opté de devoir atteindre des conditions en même temps pour décider d'arrêter l'appoint gaz :

- **La chaudière bois est en fonctionnement** (absence de défaut arrêt - indisponibilité).
- $T_{départ\ mesurée} \geq T_{départ\ (consigne)}$ → Situation où la production assure bien la demande du réseau de distribution.

Un réseau ayant de l'inertie, et suivant la disponibilité de la chaudière bois (qui ne module pas comme une chaudière gaz), un écart de tolérance peut être mis dans la condition $T_{départ\ (consigne)}$ et/ou une temporisation avant d'enclencher la condition comme étant effectivement atteinte.

- De plus, la $T_{sortie\ bois} \geq T_{départ\ (consigne)}$ → La chaudière bois a une température de sortie (production) à même de pouvoir fournir le réseau de distribution.
- $T_1 \approx T_{consigne\ entrée\ bois}$ → Signe que l'hydroaccumulateur est pleinement ou suffisamment chargé en énergie thermique, ou quasi, et peut donc assurer un rôle d'apport thermique en parallèle avec la chaudière bois. Il peut aussi être opté pour mettre la condition sur T_2 plutôt que T_1 .

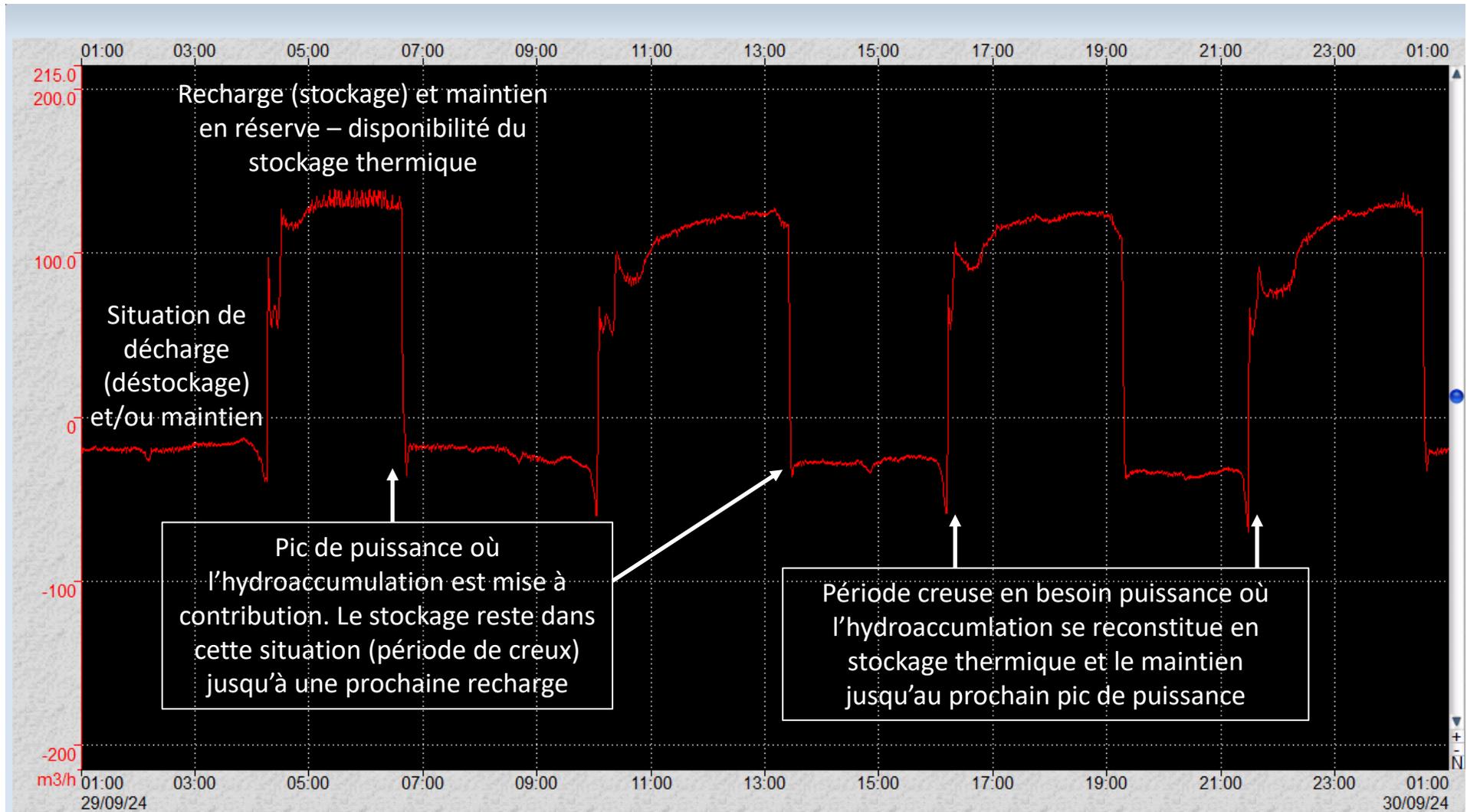
⇒ **Lorsque ces conditions sont présentes en même temps dans la supervision → arrêt automatique de la chaudière gaz.**

Quelques illustrations du débit dans l'hydroaccumulateur

Un exemple pour Brétigny-sur-Orge en période d'intersaison en ECS uniquement ou en ECS avec très peu ou pas de chauffage (démarrage partiel, ou rigueur climatique demandant très peu ou pas de besoins en chauffage).

Sur l'axe des ordonnées :
débit (m_3/h) d'écoulement
dans le stockage
thermique :

- Lorsque débit positif
→ en décharge
thermique et maintien
dans cette
configuration.
- Lorsque débit négatif
→ en rechargement
thermique et maintien
dans cette
configuration

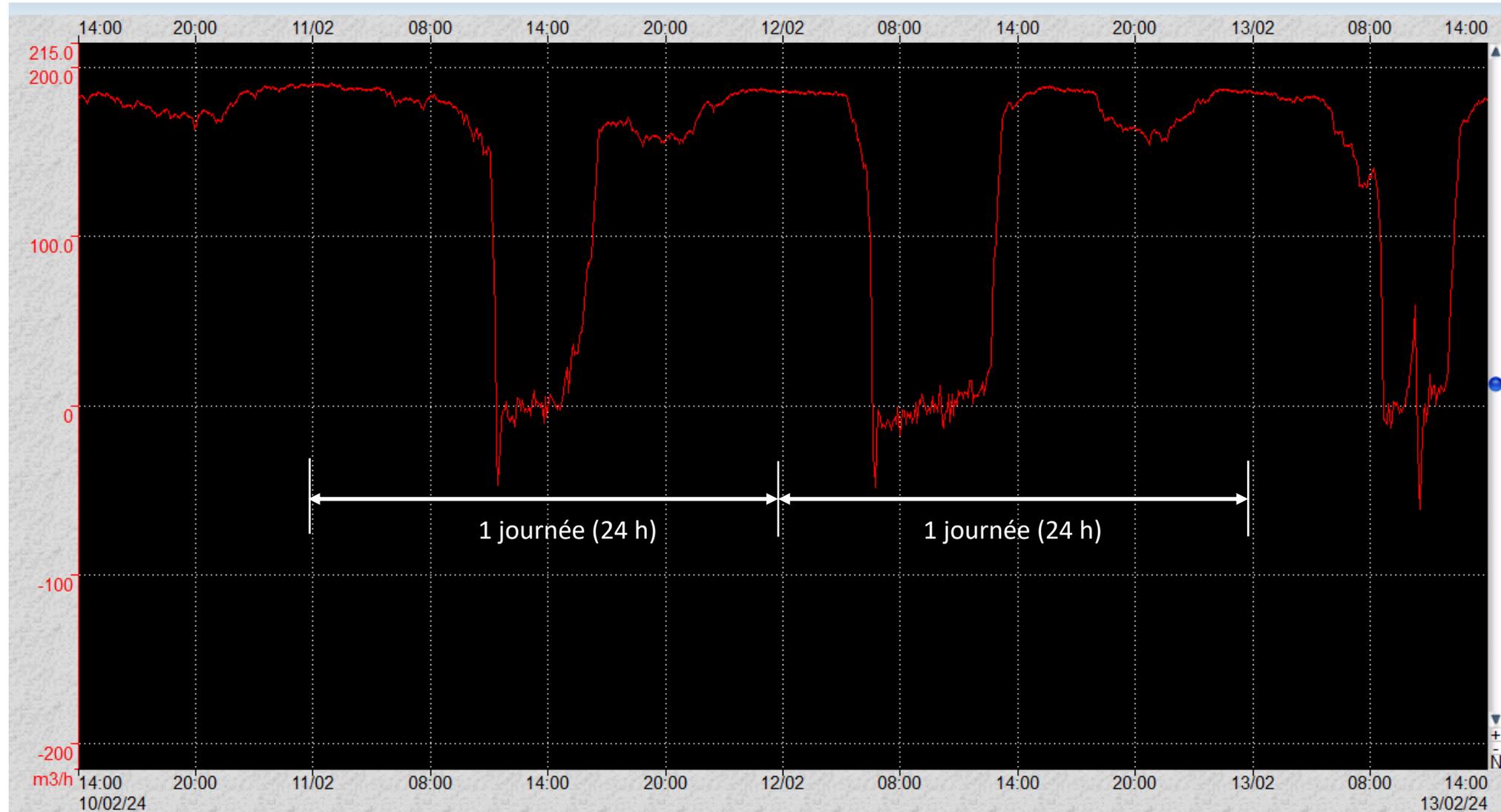


Quelques illustrations du débit dans l'hydroaccumulateur

Un exemple pour Brétigny-sur-Orge en période hivernale (ECS + chauffage).

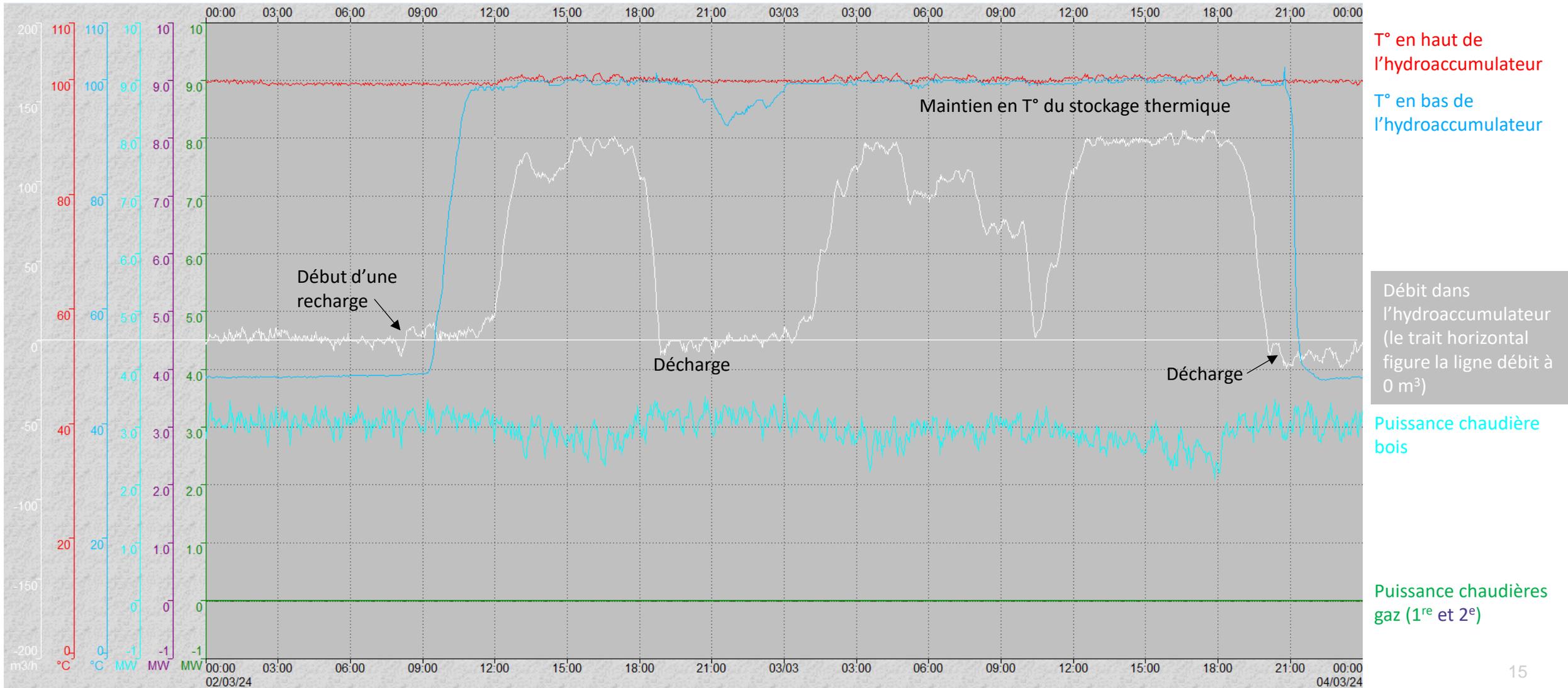
Sur l'axe des ordonnées :
débit (m_3/h) d'écoulement
dans le stockage
thermique :

- Lorsque débit positif
→ en décharge
thermique et maintien
dans cette
configuration.
- Lorsque débit négatif
→ en rechargement
thermique et maintien
dans cette
configuration



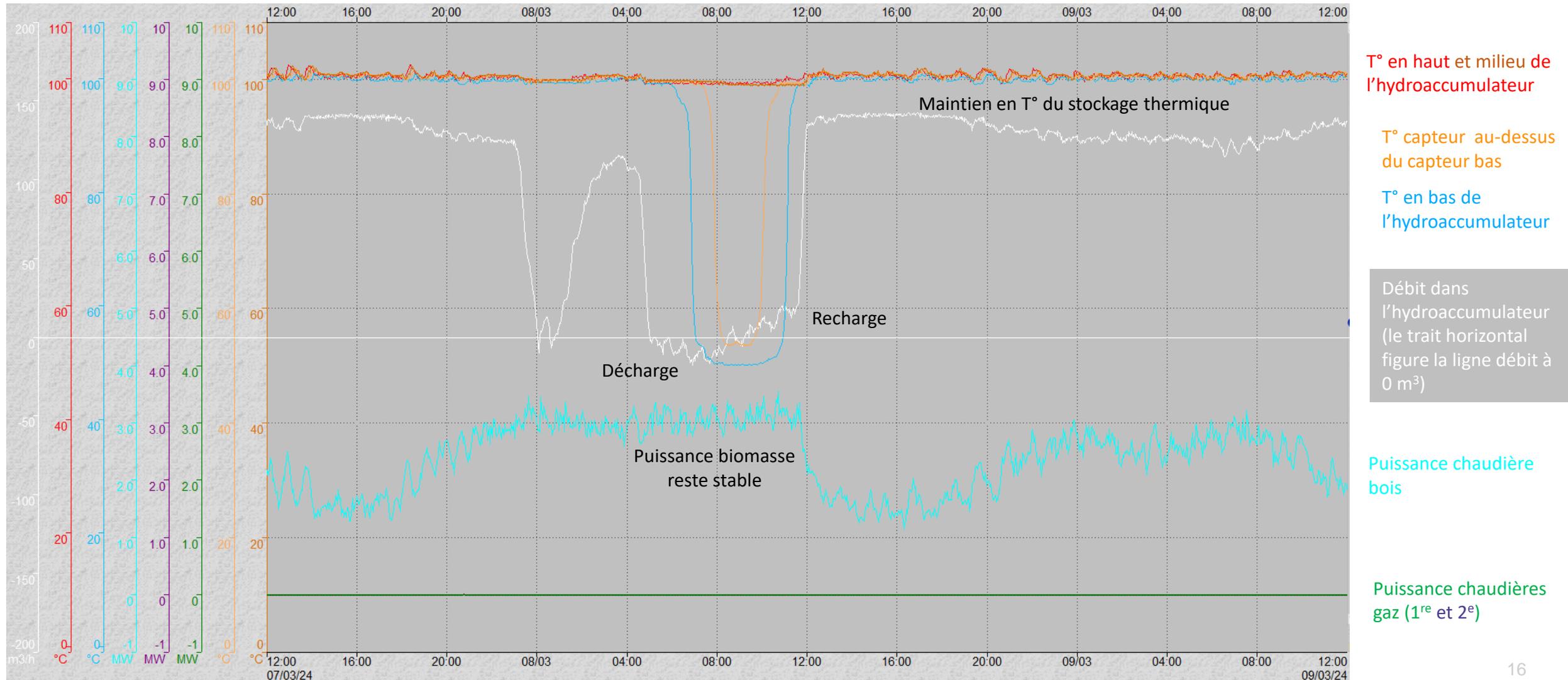
Quelques illustrations du débit dans l'hydroaccumulateur

Un exemple pour Limeil-Brévannes en saison de chauffe sans besoin appoint gaz (début mars 2024).



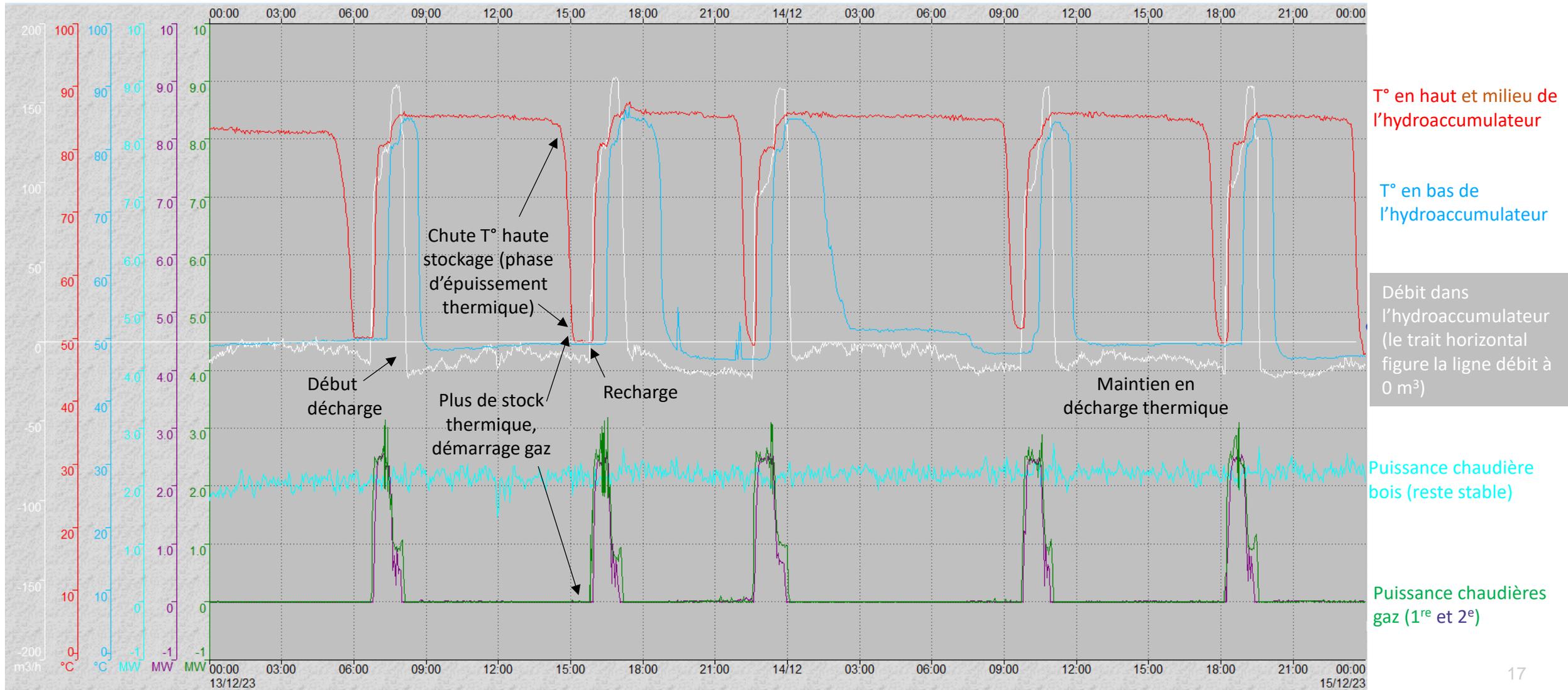
Quelques illustrations du débit dans l'hydroaccumulateur

Autre exemple pour Limeil-Brévannes en saison de chauffe sans besoin appoint gaz (début mars 2024).



Quelques illustrations du débit dans l'hydroaccumulateur

Un pour Limeil-Brévannes en saison de chauffe avec besoin appoint gaz (novembre 2023).



Quelques points clés en matière de REX

Partage de quelques aspects généraux techniques, économiques, mais aussi... humains et même organisationnels pour faire qu'un stockage thermique soit au niveau exploitation pertinente et performante :

- **Partie ingénierie – projet** : choix et/ou enjeux en matière de standardisation, mais aussi de maîtrise de la courbe d'apprentissage (continuité ou récurrence par exemple en matière de conduite et direction des projets – réalisation), ou de capitalisation au fil des réalisations (dimensionnement – conception et optimisation, planning, coûts,...), équilibre entre internalisation et externalisation (prestataires, sous-traitance) → **Constat que les choix fournisseurs et allotissements des projets de Brétigny et Limeil ont été différents.**
- **Partie passation à l'exploitation** : la formation et/ou la préparation en amont de la maintenance, la qualité ou complétude des DOE → **Lié à l'organisation et culture industrielle et services d'entreprise.**

Puissance chaudières
gaz

Quelques points clés en matière de REX

Partage de quelques aspects généraux techniques, économiques, mais aussi... humains et même organisationnels pour faire qu'un stockage thermique soit au niveau exploitation pertinente et performante :

- **Partie exploitation** : la compétence bien sûr, mais aussi l'expérience (modifier - tester), disposer de temps pour prendre du recul (emprise du quotidien, moyens et/ou aide - supports,...) et capitalisation ou transmission (turnover – recrutement, formation) → **La dynamique de communication, diffusion et/ou partage a par exemple été essentielle au niveau exploitation pour les sites de Brétigny et de Limeil-Brévannes.**

Le succès ne repose pas que sur la technique, ou encore par exemple l'automatisme process, mais aussi (et même surtout) sur les personnes et les équipes d'exploitation, qui sont une source d'amélioration (modifications, voire corrections) → **Par exemple le réseau de Brétigny-sur-Orge poursuit son développement. Le paramétrage ou les conditions de conduite du stockage thermique évolueront certainement dans le temps.**

- **Partie supervision – informations** (« big data ») : la capacité à bâtir un retour d'expérience repose aussi sur l'historisation des données (ainsi que leur qualité et pertinence, cela étant lié notamment à l'instrumentation qui a été mise en œuvre sur le process) → Traiter les données, les analyser, pouvoir les visualiser « à la carte » (pas toujours pratique ou même faisable sur une supervision achetée « à l'économie »), les suivre dans le temps sans perdre l'historique (tel par exemple que le permet « **PREDITY** », développé et utilisé par Engie) → **Le REX sur le stockage hydraulique va se poursuivre.**



Pour avoir grandement aidé en explications et apports d'informations m'ayant permis de constituer de cette présentation, un **remerciement tout particulier** à :

- **Henri Pinto**, Responsable de site (production et distribution Brétigny-sur-Orge)
- **Guillaume Ruffié**, Responsable d'équipe exploitation
- **Benjamin Robert**, Référent automaticien

Merci également à l'équipe du **CIBE** pour leur invitation et organisation !

Et merci pour votre attention à toutes et à tous !

engie-solutions.com



L'énergie est notre avenir, économisons-la !