



POWERTRAIN ENGINEERING

# RECUPERATION D'ENERGIE THERMIQUE A L'ECHAPPEMENT PAR TURBOCOMPOUND

## APPLICATION COMPETITION AUTOMOBILE & AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES

JF NICOLINO – 3 avril 2012



POWERTRAIN ENGINEERING

Mecachrome



# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
- V) CONCLUSION

# CONTEXTE

La réduction de consommation et d'émission de CO2 est une demande forte pour tous les groupes moto-propulseurs dans tous les domaines d'application: automobile, aéronautique, maritime, stationnaire..

La compétition automobile s'inscrit dans cette démarche et veut promouvoir des technologies et systèmes de réduction de consommation et d'amélioration de rendement des groupes moto-propulseurs. Les systèmes de récupération d'énergie existent déjà en F1 et LMP1 (système « KERS ») et il sera possible en 2014 en F1 d'utiliser un système de récupération d'énergie thermique à l'échappement (système ERS), utilisant le principe du turbocompound.

Dans cet exposé il sera présenté:

- un bref rappel historique du turbocompound
- des applications en cours de développement en compétition automobile
- les applications potentielles dans d'autres domaines: aéronautique, automobile série...

# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
- V) CONCLUSION

# ETAT DE L'ART HISTORIQUE TURBOCOMPOUND MECANIQUE

A partir des années 1950, plusieurs projets de turbo-compound mécanique ont été développés.  
Citons par exemple l'application aéronautique de turbo-compound mécanique des moteurs  
*CURTIS WRIGHT cyclone R3350*

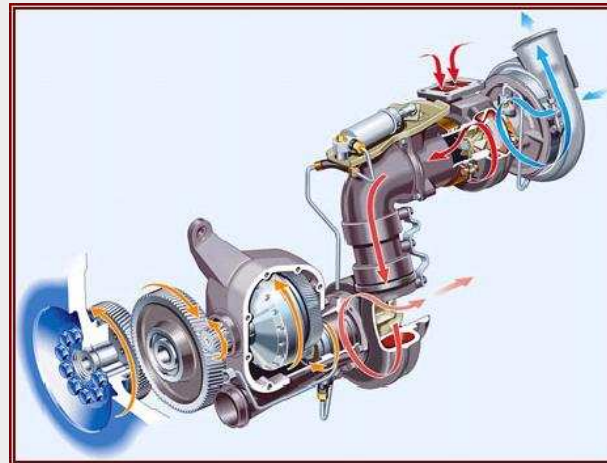
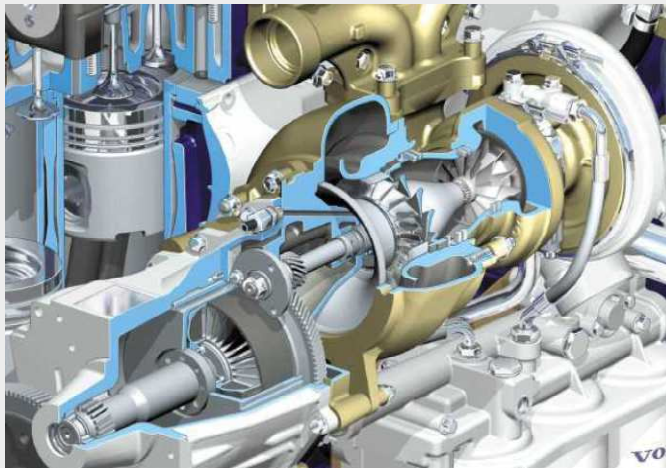




# ETAT DE L'ART HISTORIQUE TURBOCOMPOUND MECANIQUE

Plus récemment, des applications industrielles ont été réalisées dans le domaine des moteurs poids-lourds.

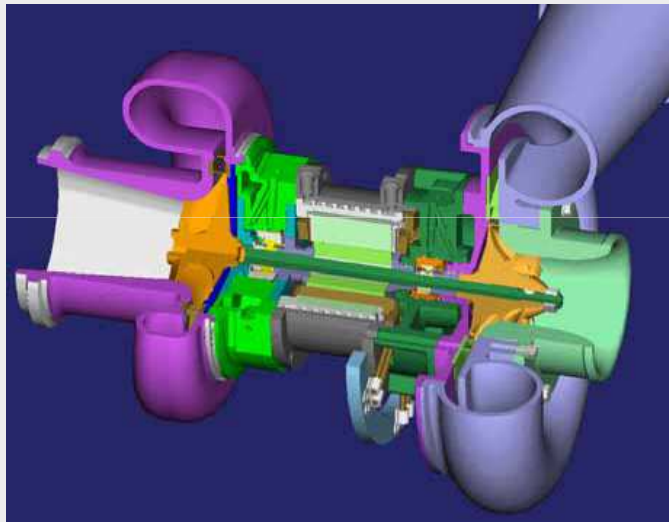
Citons par exemple les applications SCANIA *DTC12* et VOLVO *D12500TC*



# ***ETAT DE L'ART HISTORIQUE TURBOCOMPOUND ELECTRIQUE***



Plusieurs projets de développement industriels de turbo-compound électrique sont en cours.  
Citons par exemples les développements menés par CATERPILLAR.



# *ETAT DE L'ART SYNTHESE*

Les applications existantes en turbo-compound, notamment mécanique, montrent un gain en rendement de l'ordre de grandeur de 10% avec une bonne adaptation aux moteurs fonctionnant sur un point fixe (aéronautique) ou avec peu de dynamique d'utilisation (poids lourds) mais toujours en forte charge.

L'opportunité qui se présente à nous est de profiter de l'hybridation de véhicule et des progrès réalisés dans le domaine des moteurs électriques pour réaliser des systèmes de turbo-compound électrique qui facilitent le couplage entre le vilebrequin et la turbine du turbo-compound (notamment en dynamique) tout en conservant des gains en rendement importants sur certains points du domaine d'utilisation sur lesquels le système sera optimisé.



# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
  - ✓ REGLEMENT FIA
  - ✓ ARCHITECTURES POSSIBLES
  - ✓ SIMULATIONS (Application turbodiesel)
  - ✓ SYNTHESE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
- V) CONCLUSION

# ***TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA COMPETITION AUTOMOBILE REGLEMENT***



Les évolutions technologiques en compétition automobile ont souvent été engendrées par des évolutions de règlement technique.

La FIA souhaite faire la promotion de nouvelles technologies d'optimisation de rendement énergétique et de récupération d'énergie perdue avec la Formule 1 comme support , ce qui entraînera les autres disciplines dans cette voie.

# **TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA COMPETITION AUTOMOBILE REGLEMENT F1 2014**

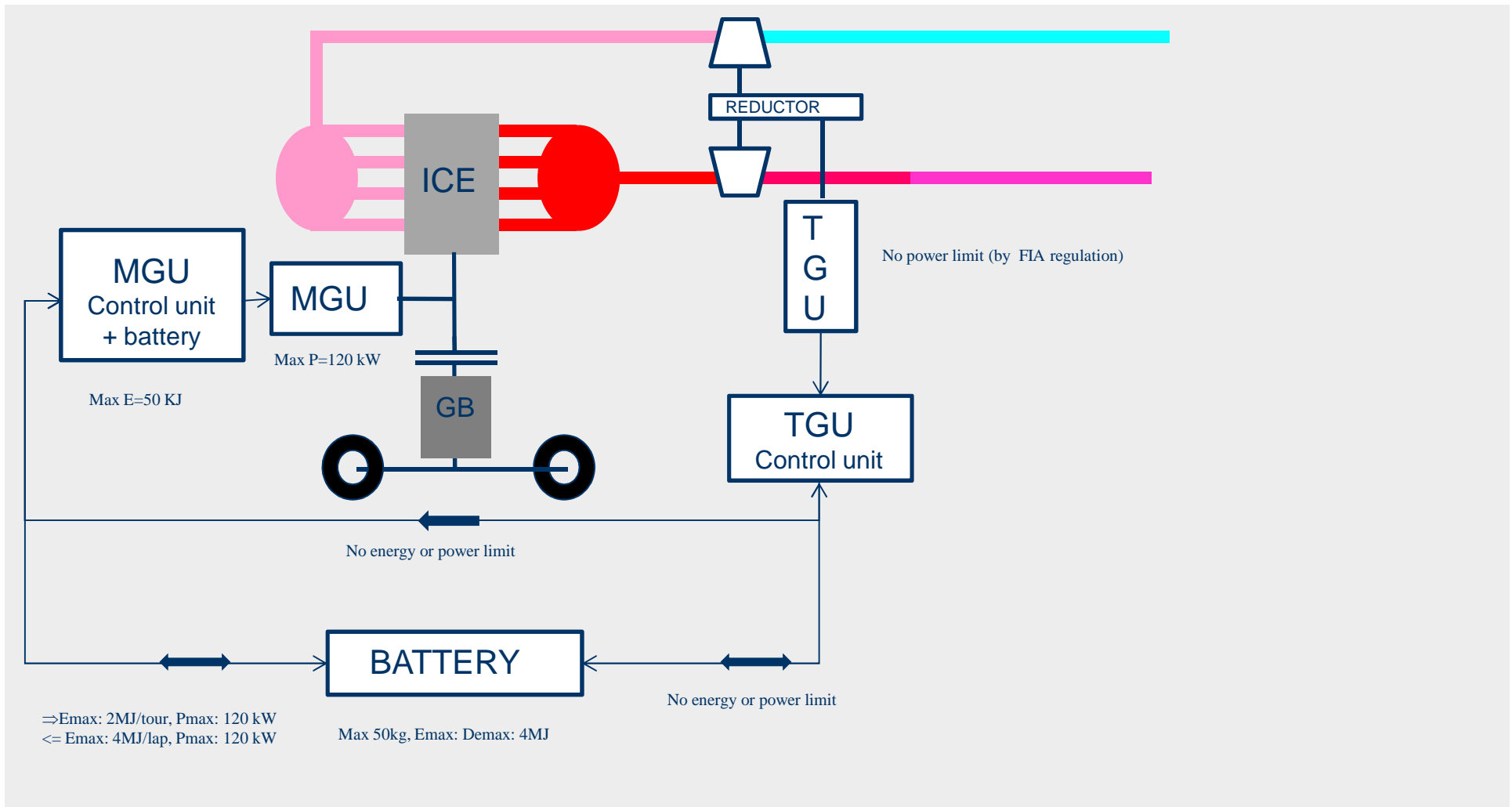


Depuis 2009, la récupération d'énergie cinétique au freinage a été introduite avec des puissances maximales relativement faibles (60 kW) et surtout des énergies stockées faibles (400kJ), la durée d'utilisation étant limitée à moins de 7s par utilisation.

En 2014, le règlement prévoit d'augmenter l'énergie stockée sous forme électrique (4MJ utilisable par tour ald 400 kJ) mais surtout le règlement permettra d'adjoindre à la récupération d'énergie cinétique, la possibilité de récupérer de l'énergie thermique à l'échappement avec des niveaux de puissance relativement élevés (~100 kW).

Ce règlement va conduire à une course au rendement et non plus à la puissance maximale, le volume de carburant (donc l'énergie disponible) sera figé en début de course et diminuera d'année en année.

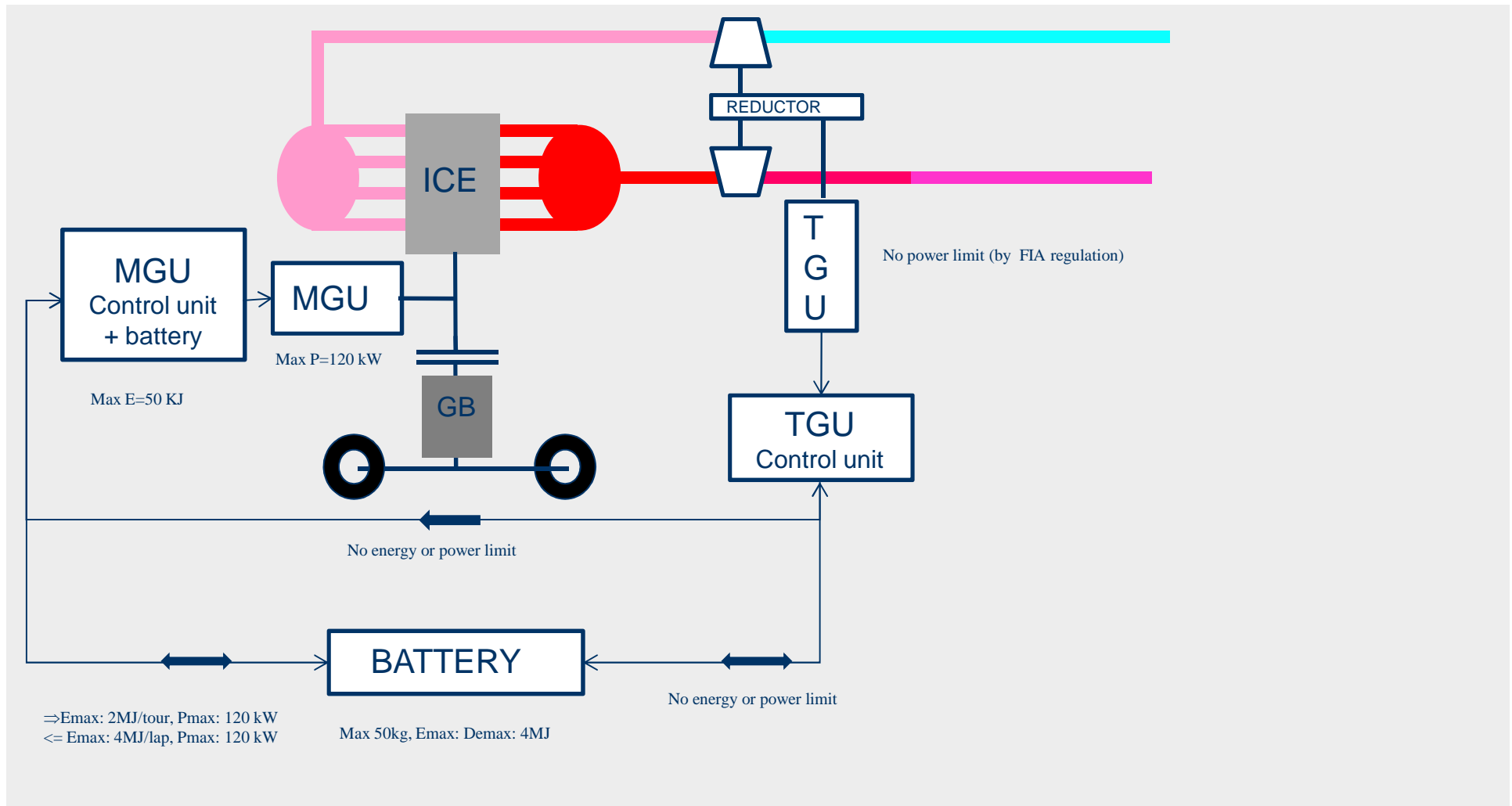
# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA COMPETITION AUTOMOBILE REGLEMENT F1 2014



# AGENDA

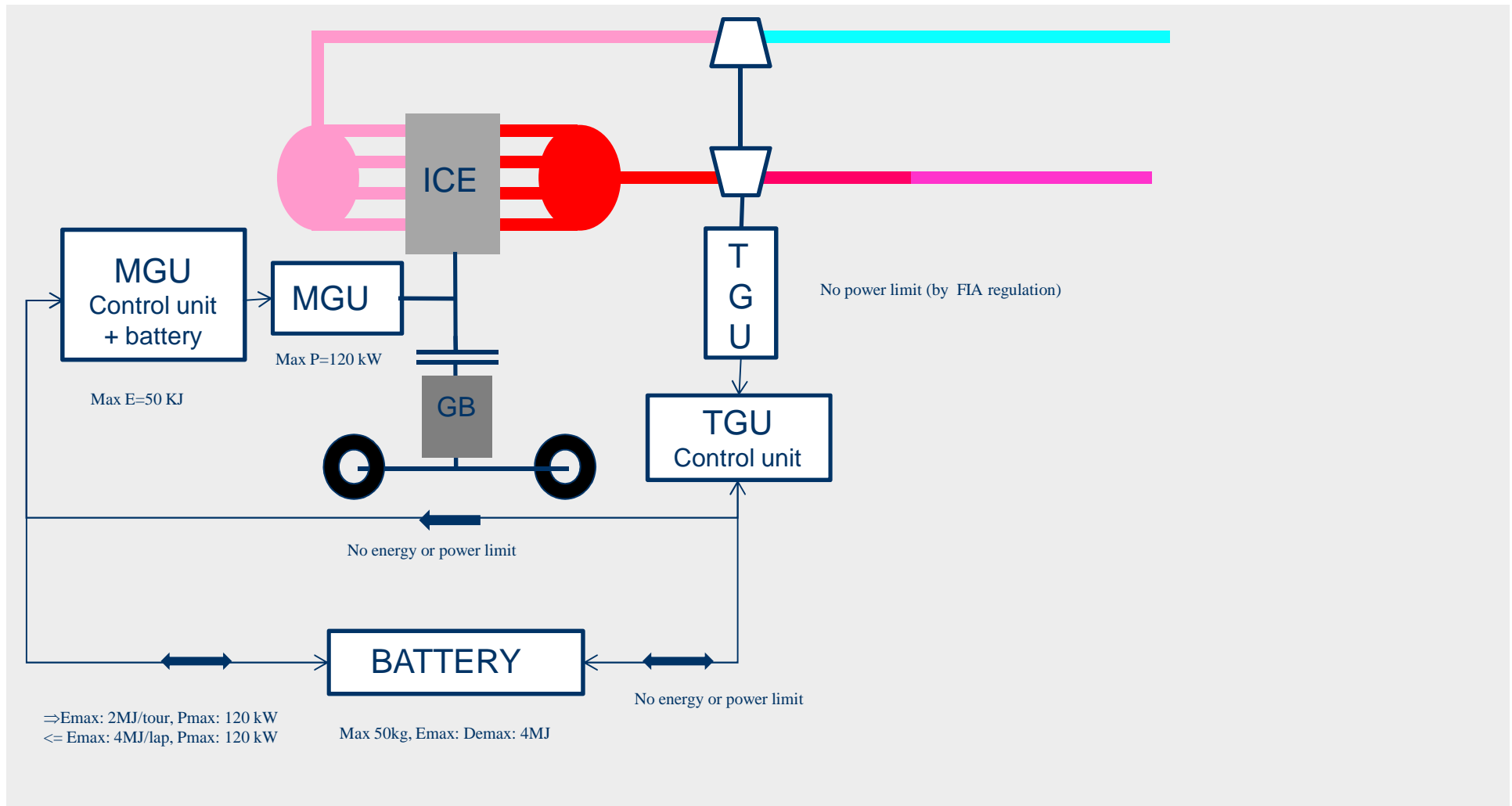
- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
  - ✓ REGLEMENT FIA
  - ✓ ARCHITECTURES POSSIBLES
  - ✓ SIMULATIONS (Application turbodiesel)
  - ✓ SYNTHESE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
- V) CONCLUSION

# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA COMPETITION AUTOMOBILE ARCHITECTURES POSSIBLES (ex F1)

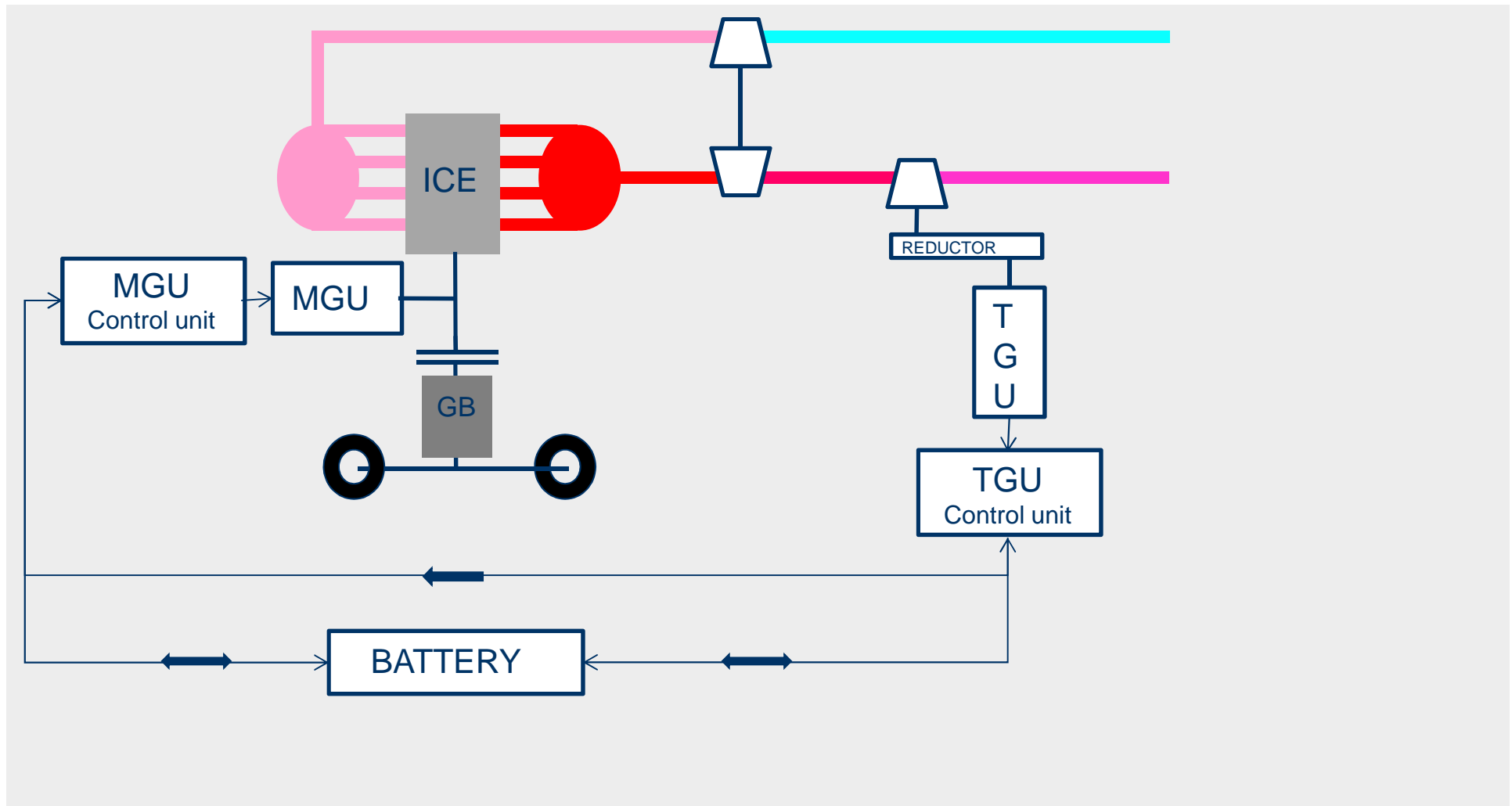




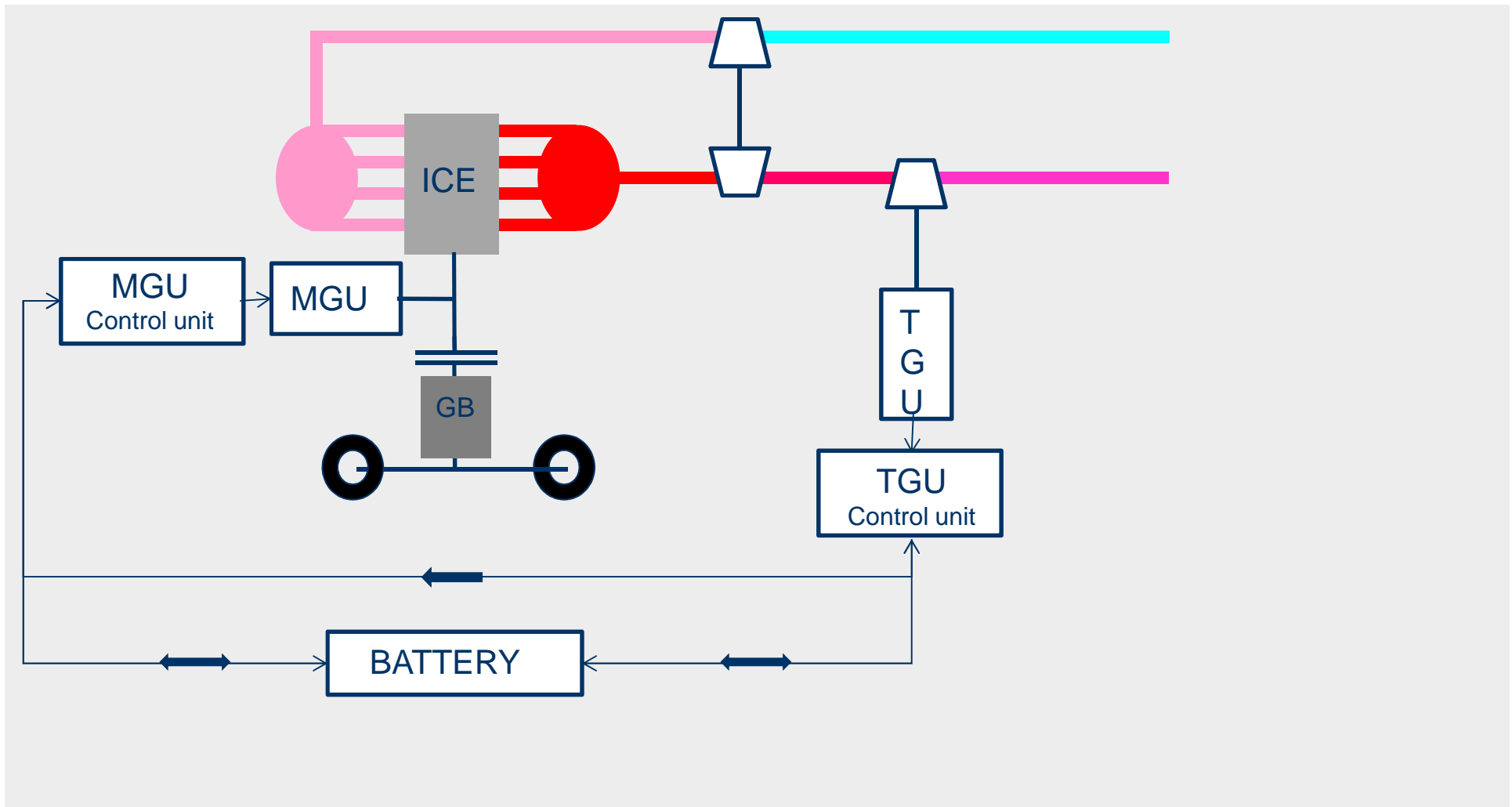
# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA COMPETITION AUTOMOBILE ARCHITECTURES POSSIBLES (ex F1)



# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA COMPETITION AUTOMOBILE ARCHITECTURES POSSIBLES



# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA COMPETITION AUTOMOBILE ARCHITECTURES POSSIBLES



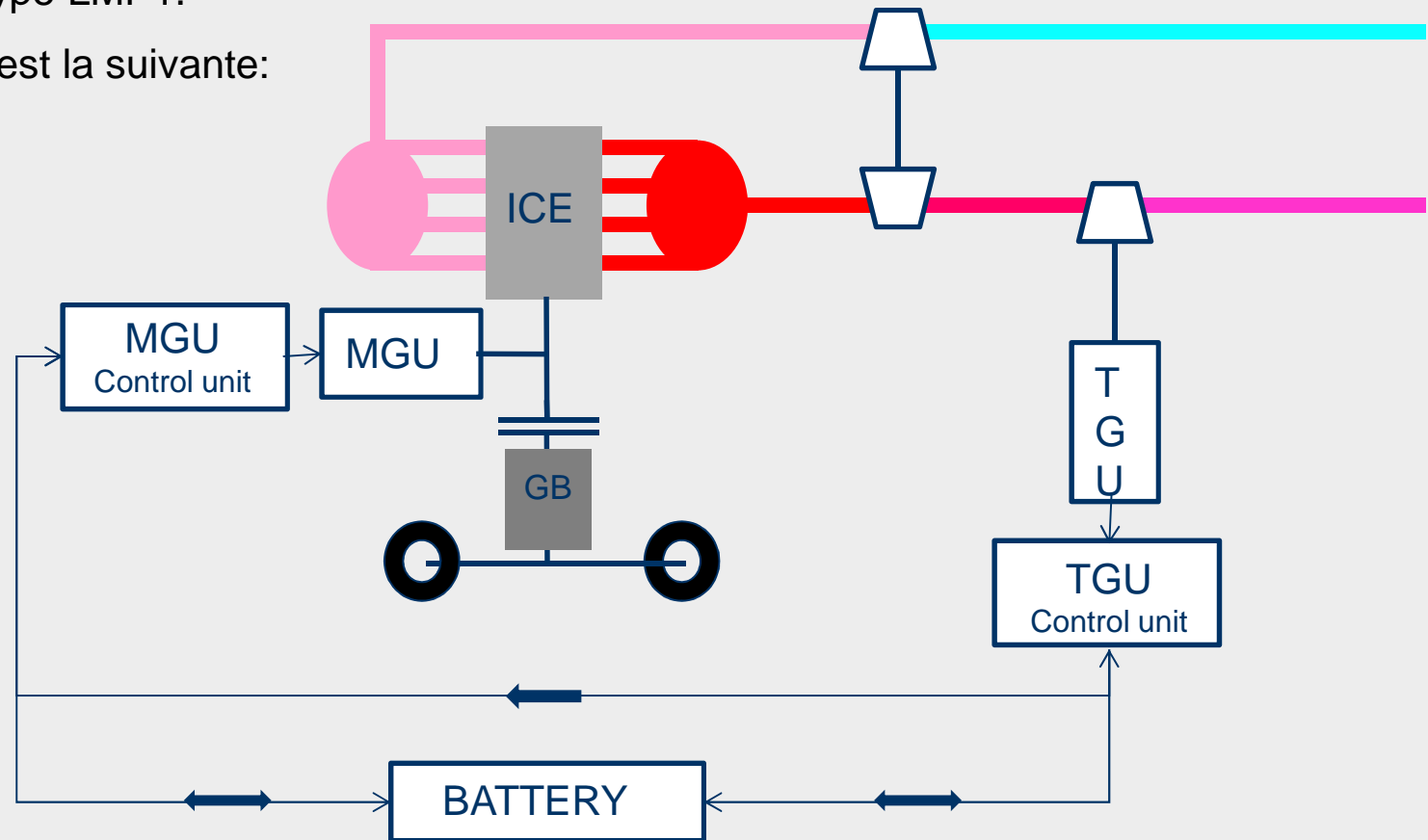
# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
  - ✓ REGLEMENT FIA
  - ✓ ARCHITECTURES POSSIBLES
  - ✓ SIMULATIONS (Application turbodiesel)
  - ✓ SYNTHESE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
- V) CONCLUSION

# TURBO COMPOUND APPLICATION TURBODIESEL COMPETITION

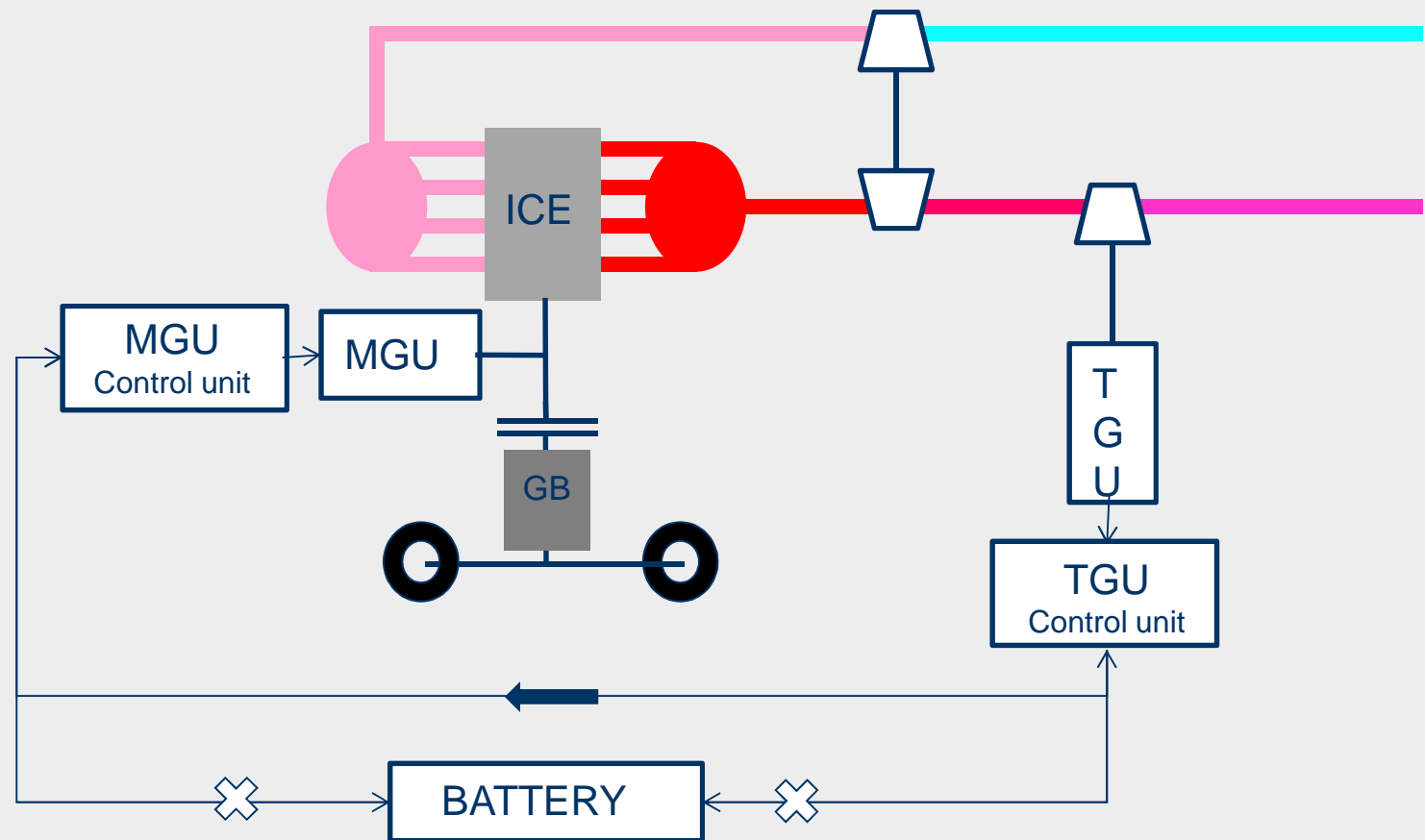
Pour des raisons de confidentialité par rapport à l'actualité des développements en cours sur les motorisations F1, nous traiterons de l'application turbo-compound compétition sur une base moteur turbo-diesel type LMP1.

L'architecture choisie est la suivante:



# TURBO COMPOUND APPLICATION TURBODIESEL COMPETITION SIMULATION PERFORMANCE TGU->MGU

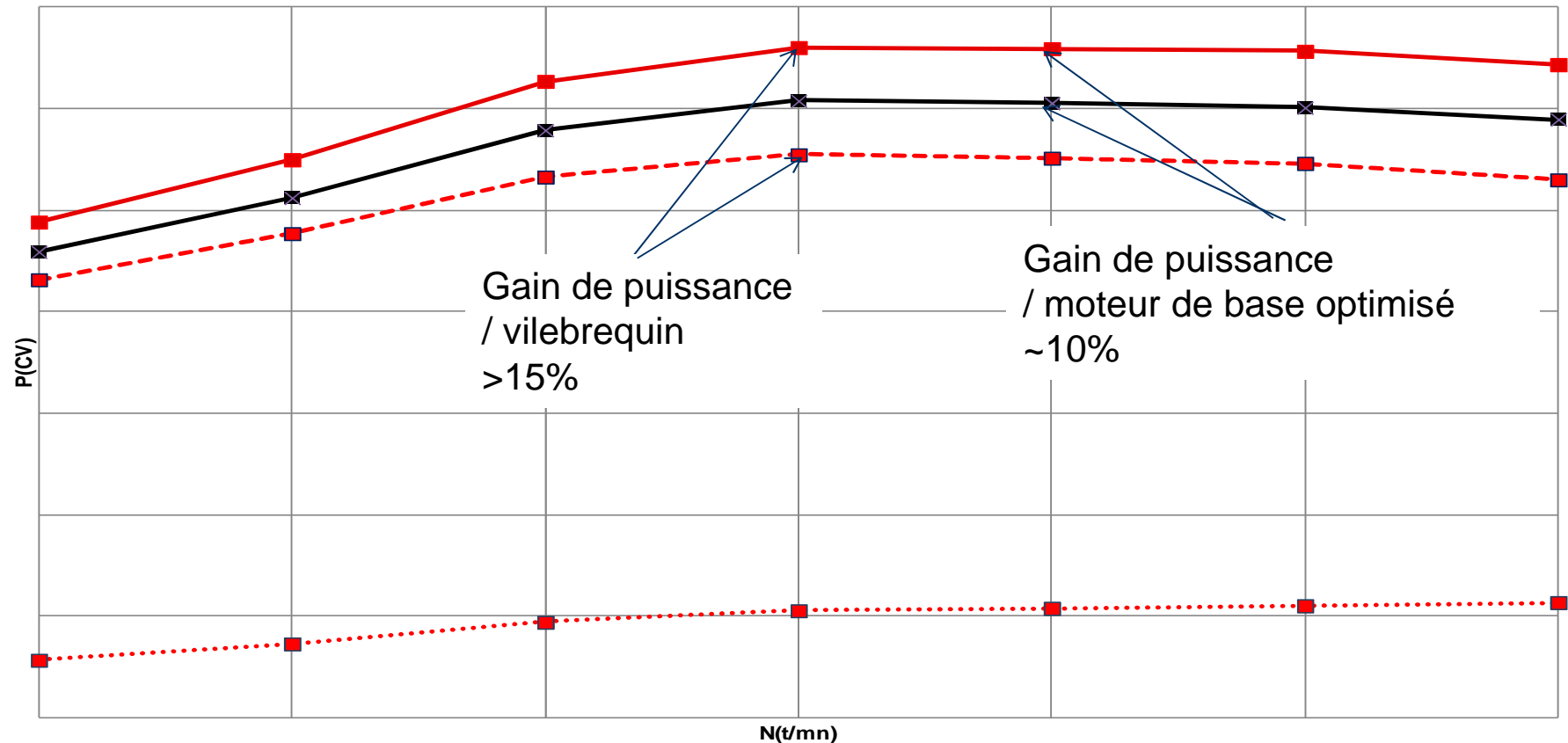
Les simulations de performance présentées ci-après traitent du turbo-compound seul, sans stockage.





# TURBO COMPOUND APPLICATION TURBODIESEL COMPETITION SIMULATION PERFORMANCE TGU -> MGU

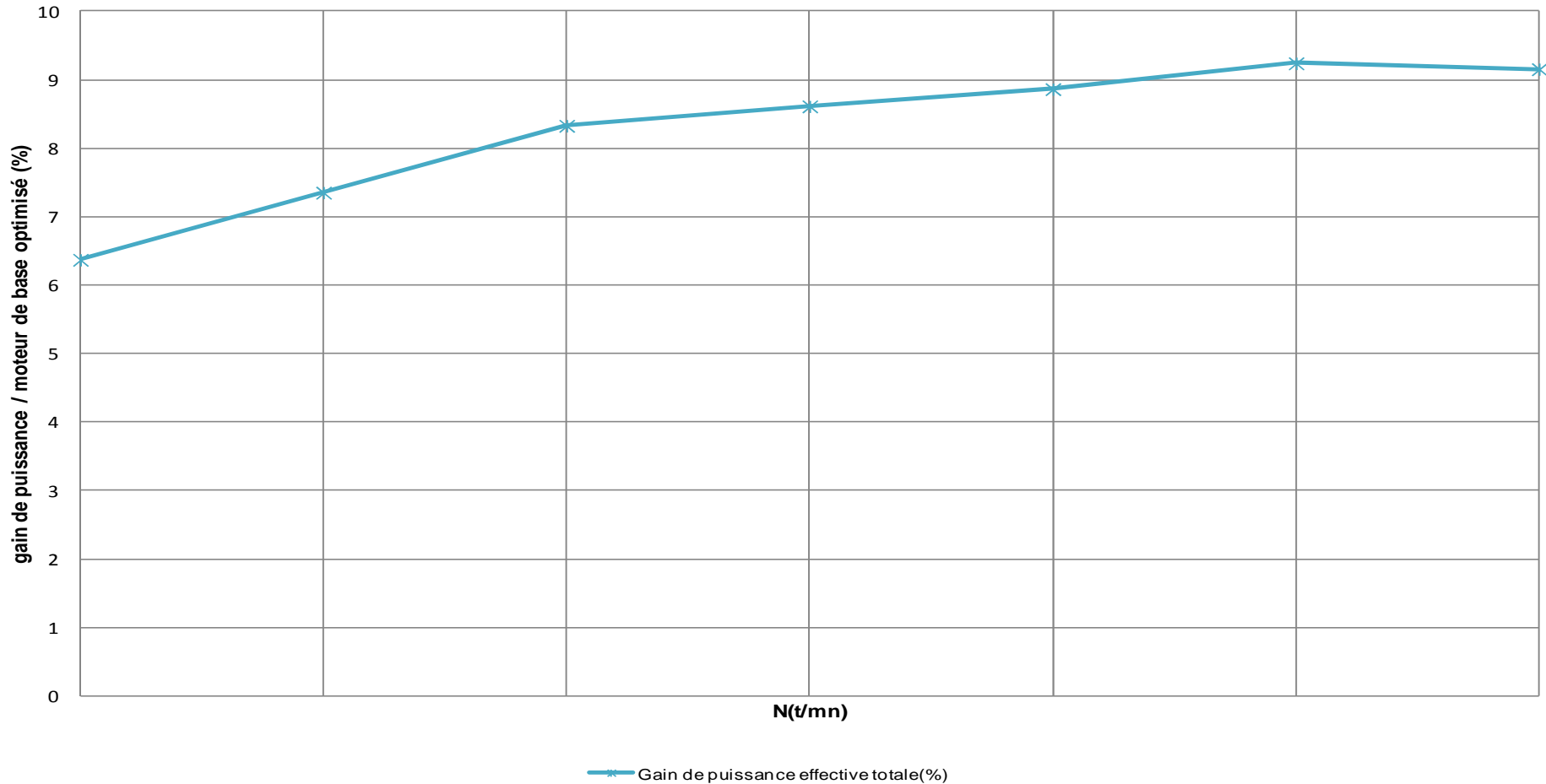
PUISSANCE EFFECTIVE, VILEBREQUIN et TURBINE  
TURBO-DIESEL E-TURBOCOMPOUND



●-■-● Peff turbines   
 -■- Peff vilebrequin   
 -■- Peff totale   
 -x- Puissance effective totale de référence (moteur de base opti)

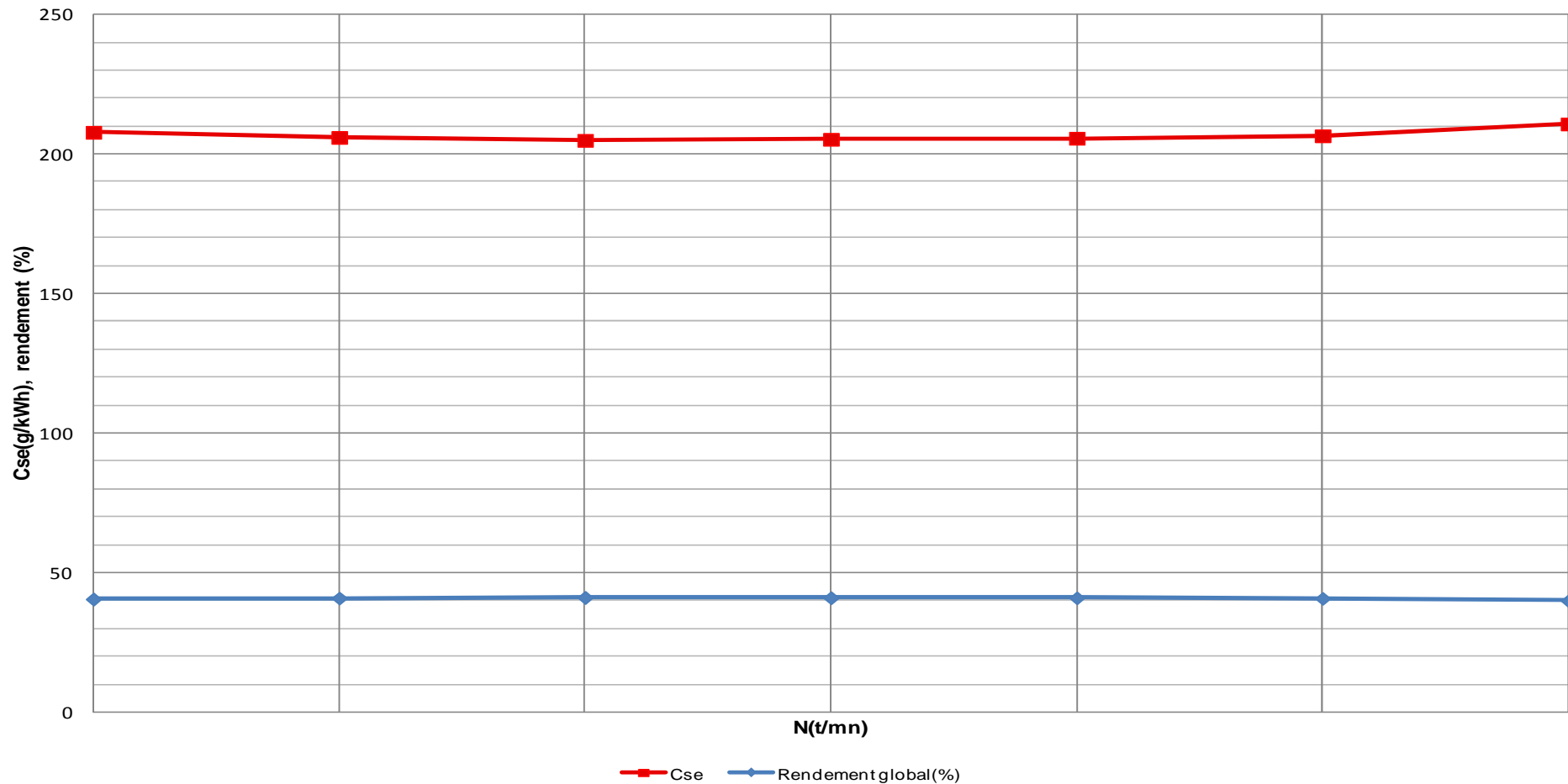
# TURBO COMPOUND APPLICATION TURBODIESEL COMPETITION SIMULATION PERFORMANCE TGU -> MGU

GAIN DE PUISSANCE (%)  
E-TURBOCOMPOUND / MOTEUR DE BASE OPTIMISE SANS TURBOCOMPOUND



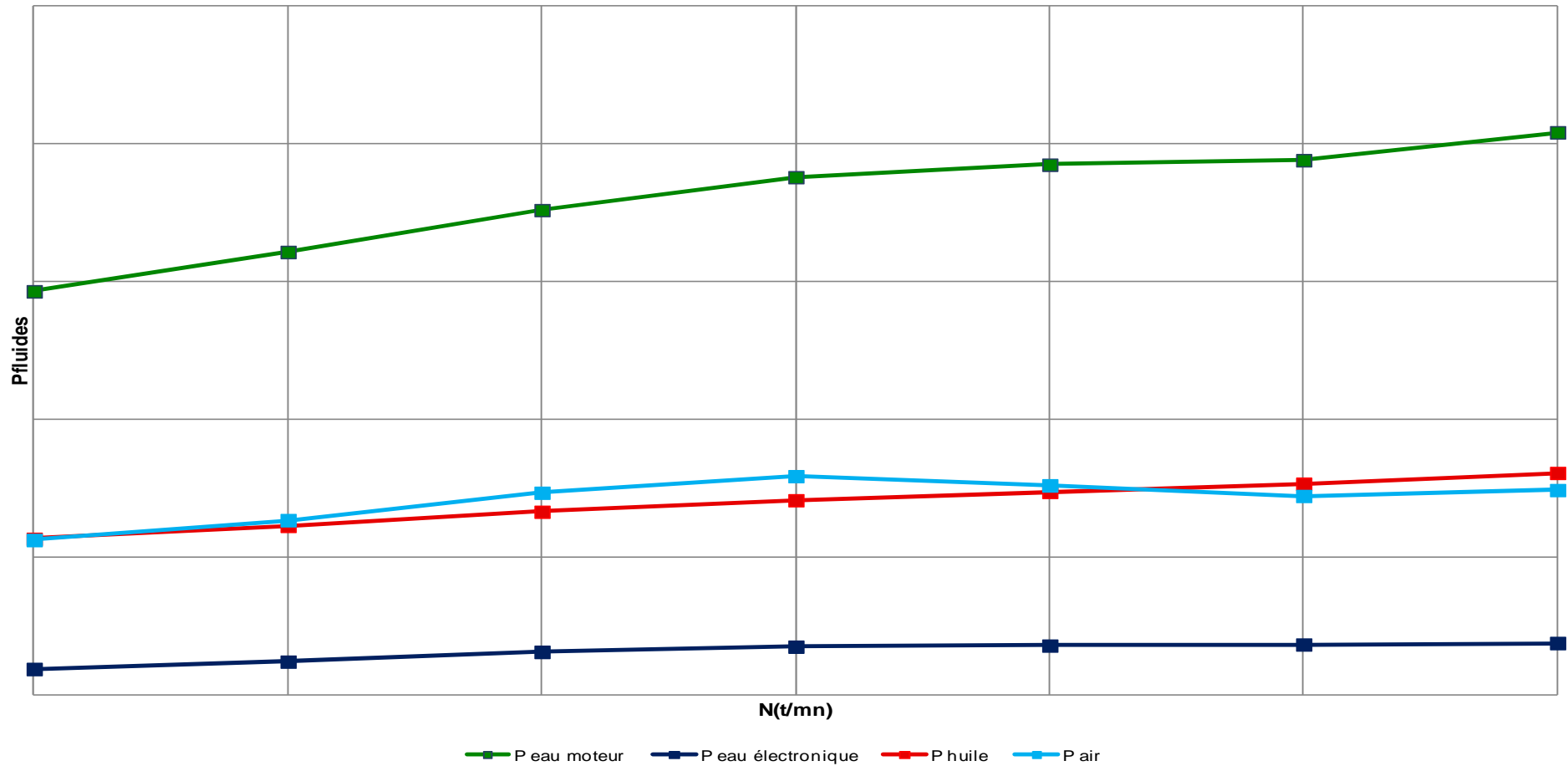
# TURBO COMPOUND APPLICATION TURBODIESEL COMPETITION SIMULATION PERFORMANCE TGU -> MGU

CONSOMMATION SPECIFIQUE et RENDEMENT  
TURBO-DIESEL E-TURBOCOMPOUND



# TURBO COMPOUND APPLICATION TURBODIESEL COMPETITION SIMULATION PERFORMANCE TGU -> MGU

PUISSANCE FLUIDES  
TURBO-DIESEL E-TURBOCOMPOUND



# TURBO COMPOUND APPLICATION TURBODIESEL COMPETITION CONCLUSION

## Synthèse:

- gain de performance et rendement de l'ordre de 10% en pleine charge atteignable sur la totalité de la plage d'utilisation (qui reste étroite en compétition automobile) par rapport à un moteur de même architecture optimisé.
- Rapport poids/puissance de l'ordre de 0,3 kg/kW (0,2 à 0,4 kg/kW suivant hypothèses).

## Points durs:

- Gestion de la contrepression échappement généré par la turbine :
  - => Conception spécifique du système de combustion, de la boucle d'air et du système d'injection.
- Régimes de rotation élevés ( $N \sim 100\,000$  tr/mn) pour réduire le rapport poids/puissance:
  - => gestion des problèmes de dynamique de ligne d'arbre et de paliers.
- Rendements élevés des moteurs et leur électronique de puissance ( $\eta_{TGU \rightarrow MGU} \gg 0,85$ ) à haut régime de rotation:
  - => choix innovants de l'architecture et des technologies des moteurs et de leur électronique de puissance.

# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
  - ✓ AERONAUTIQUE
  - ✓ POIDS LOURDS et OFF ROAD
  - ✓ GROUPE ELECTROGENE
  - ✓ SERIE AUTOMOBILE
- V) CONCLUSION



# TURBO COMPOUND

## APPLICATION AERONAUTIQUE



### Contexte:

Les moteurs à pistons turbo-diesel vont se développer en aéronautique sur les faibles puissances (< 1000 kW), cette technologie présentant un potentiel important de réduction de consommation et d'émission de polluants par rapport aux turbines.

### Intérêt du turbocompound en aéronautique:

Le turbocompound est un système qui permet de réaliser des gains de rapport poids/puissance sur les groupes moto-propulseurs, l'augmentation de puissance est en effet réalisée avec un rapport poids/puissance de l'ordre de 0,3 kg/kW sur un groupe moto-propulseur de base présentant un rapport poids/puissance de 0,6 à 0,8 kg/kW (en référence au groupe moto-propulseur de base développé par TEOS dans le domaine aéronautique).

### Points durs:

NB: La fiabilité des moteurs électriques et de l'électronique de puissance associée reste à démontrer avec le rapport poids puissance énoncé (0,3 kg/kW) sur des durées de vies supérieures à 2000h.

# ***TURBO COMPOUND APPLICATION AERONAUTIQUE***

Les applications potentielles sont:

- les groupes moto-propulseurs principaux en application avion et hélicoptère.
- les groupes de génération de puissance (APU) en application avion principalement.

NB: L'électrification des commandes et des actionneurs de puissance est une tendance forte en aéronautique. Il sera nécessaire dans l'avenir de disposer de systèmes de production de puissance électrique importante. Le turbocompound électrique s'inscrit donc pleinement dans cette tendance.

# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
  - ✓ AERONAUTIQUE
  - ✓ POIDS LOURDS et OFF ROAD
  - ✓ GROUPE ELECTROGENE
  - ✓ SERIE AUTOMOBILE
- V) CONCLUSION

# ***TURBO COMPOUND APPLICATION POIDS LOURDS***

## Synthèse:

Les moteurs poids lourds se prêtent particulièrement bien à l'utilisation du turbocompound du fait de l'utilisation forte charge avec peu de dynamique (cf développement de turbocompound mécanique Scania et Volvo).

Le turbocompound électrique trouvera sa place lorsque toutes les problématiques de fiabilité et de coût des systèmes électriques seront levées.

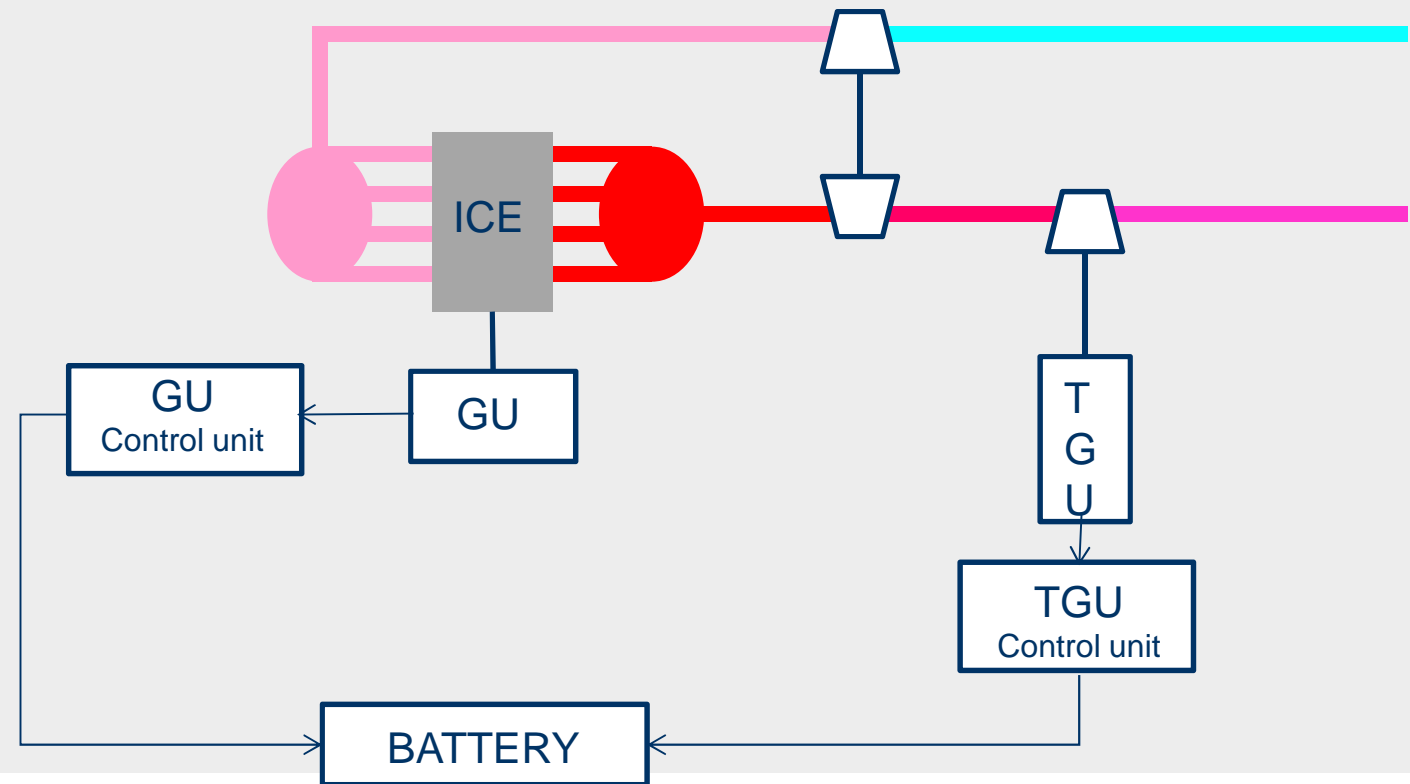
# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
  - ✓ AERONAUTIQUE
  - ✓ POIDS LOURDS ET OFF ROAD
  - ✓ GROUPE ELECTROGENE
  - ✓ SERIE AUTOMOBILE
- V) CONCLUSION

# TURBO COMPOUND APPLICATION GROUPE ELECTROGENE

## Synthèse:

Les groupes électrogènes à base de moteur à pistons sont de bonnes applications potentielles pour le turbo-compound électrique. La charge des batteries pouvant être réalisée par le Générateur principal (GU) et le e-turbocompound (TGU).

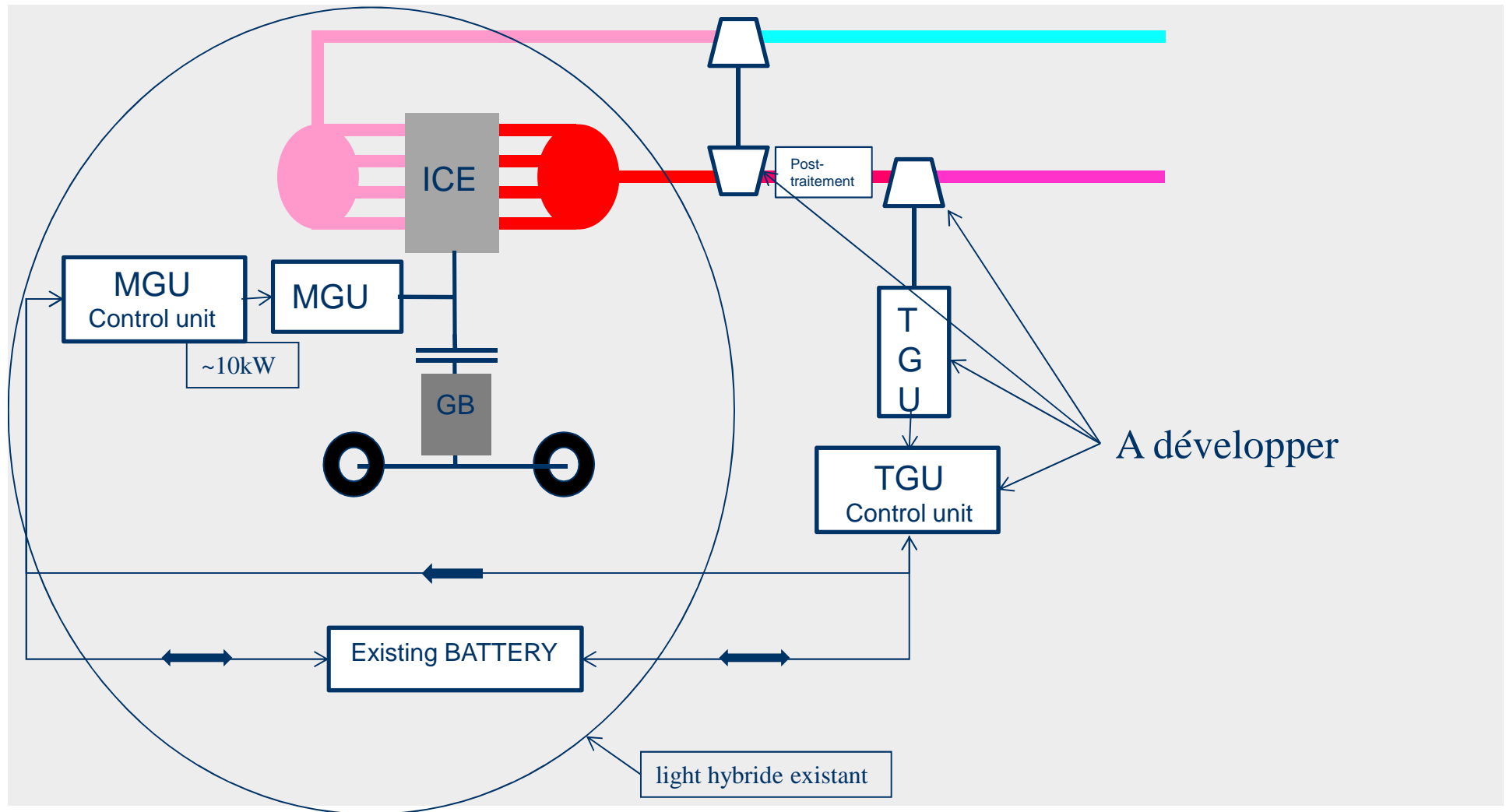


# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
  - ✓ AERONAUTIQUE
  - ✓ POIDS LOURDS et OFF ROAD
  - ✓ GROUPE ELECTROGENE
  - ✓ SERIE AUTOMOBILE
- V) CONCLUSION

# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA SERIE AUTOMOBILE

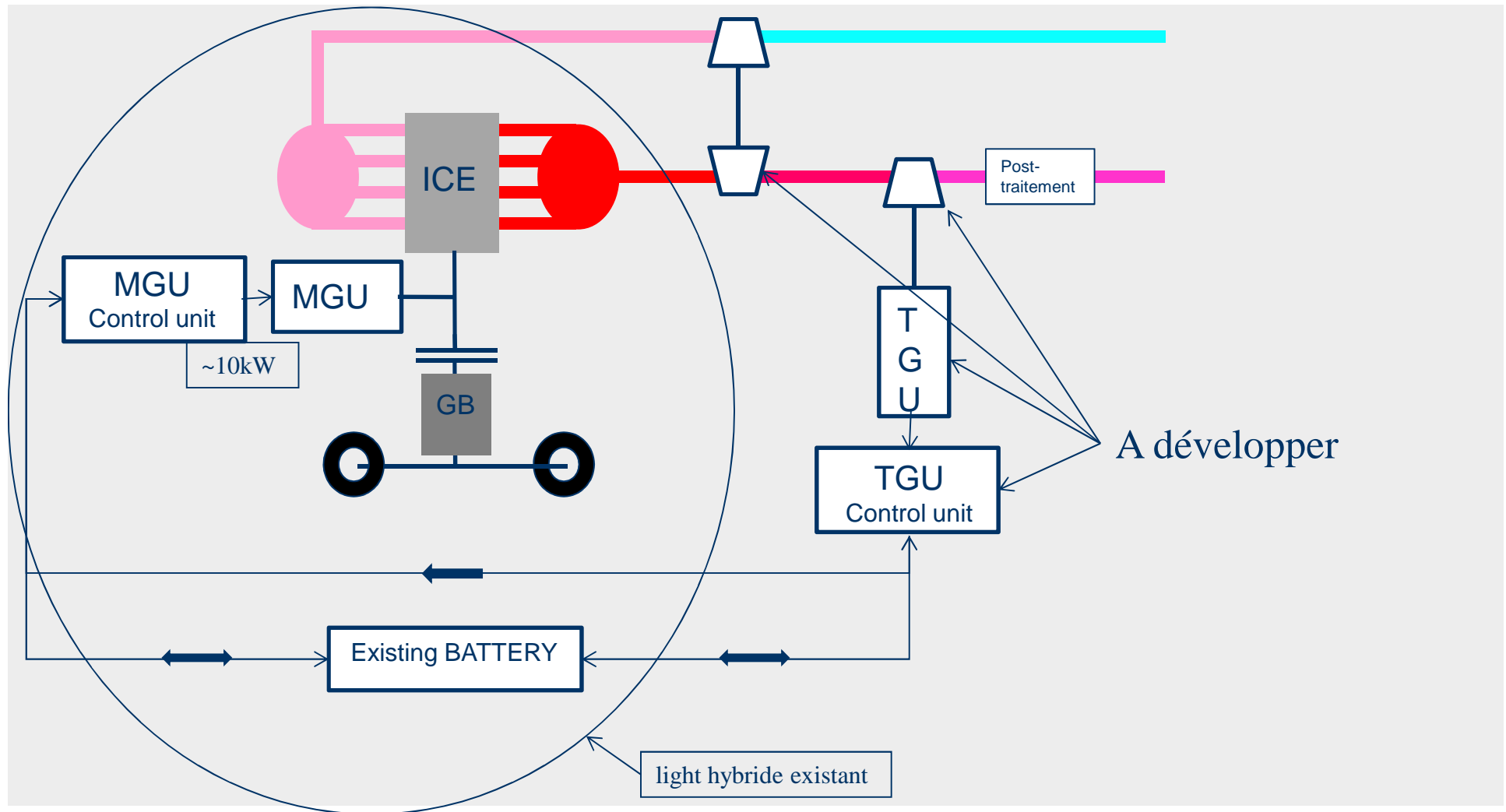
## ARCHITECTURES POSSIBLES





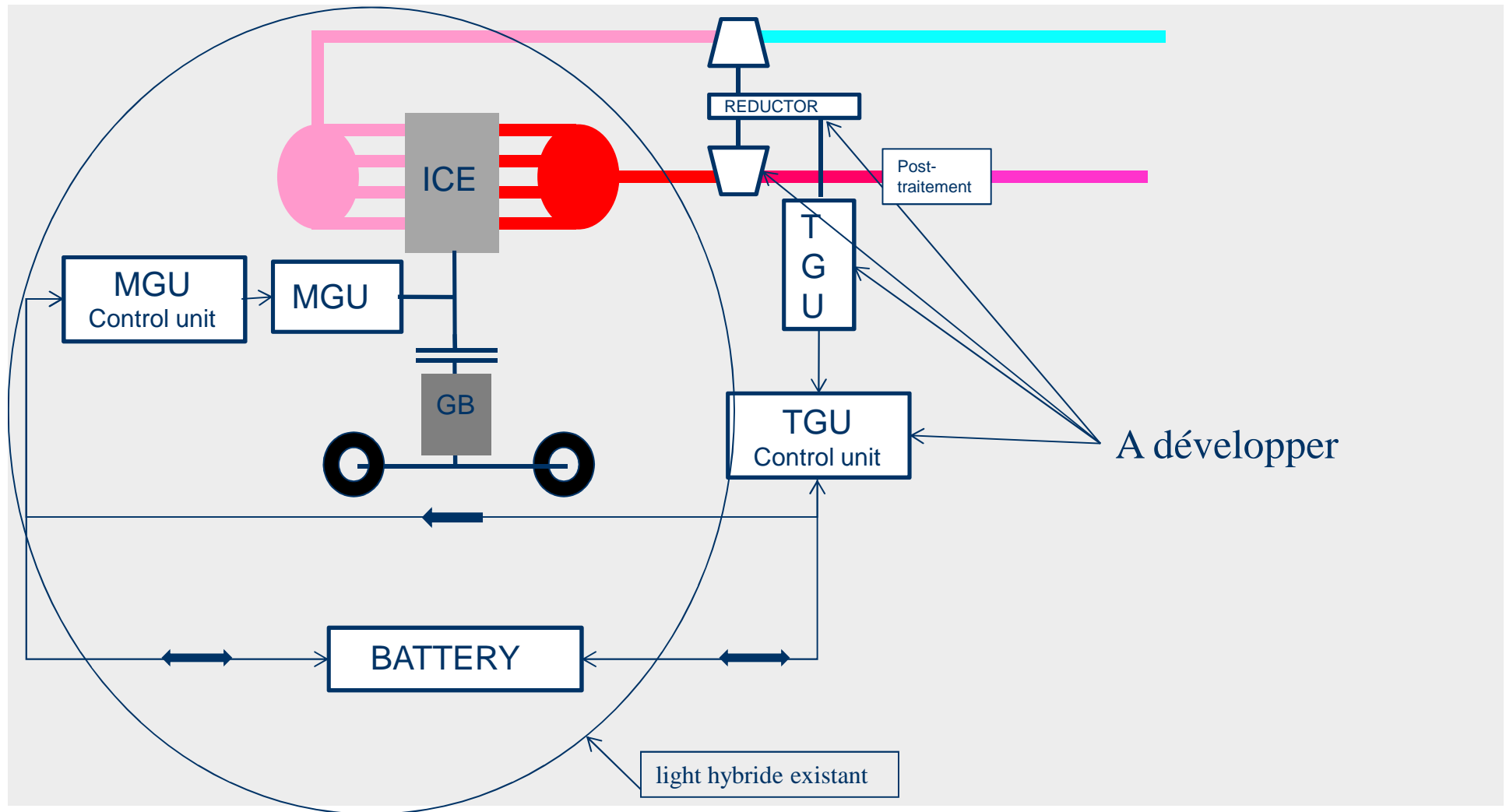
# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA SERIE AUTOMOBILE

## ARCHITECTURES POSSIBLES

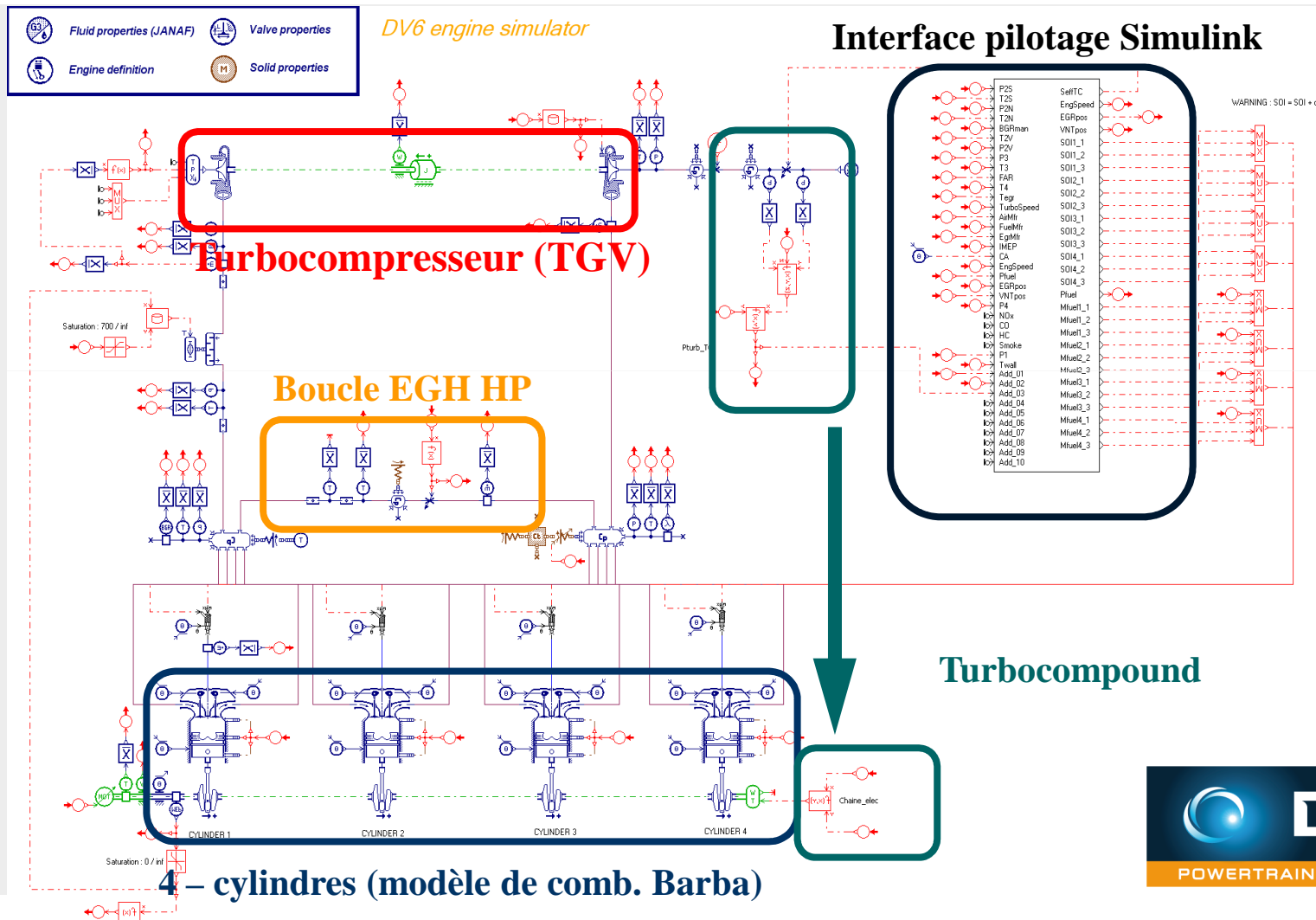


# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA SERIE AUTOMOBILE

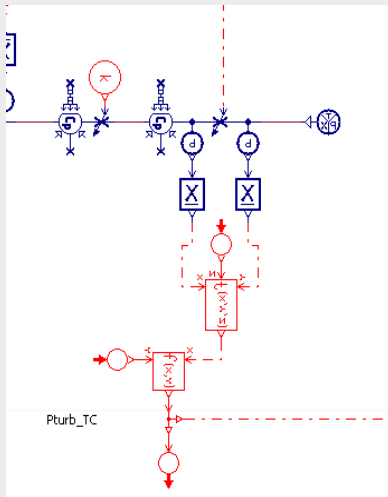
## ARCHITECTURES POSSIBLES



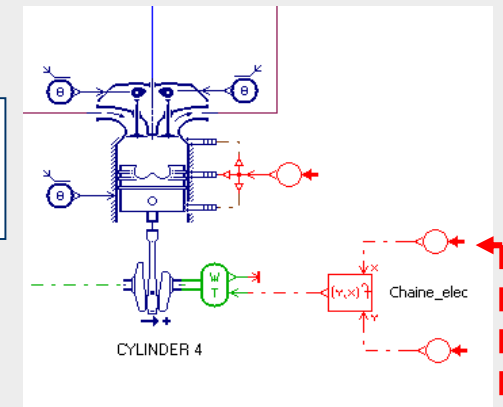
# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA SERIE AUTOMOBILE SIMULATION



# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA SERIE AUTOMOBILE SIMULATION



$$P_{Turbocompand} = Q_{ech} * C_p * T_4 * \left(1 - Pi_t^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}\right) * \eta_{turbocompand}$$



$$T_{Turbocompand} = \eta_t * \frac{P_{Turbocompand}}{EngSpeed * \frac{\pi}{30}}$$

## Hypothèses :

- ✓ système placé en aval du post-traitement
- ✓ rendement de la turbine du turbocompound constant = 0,7
- ✓ rendement de "transmission" électrique = 0,85

# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA SERIE AUTOMOBILE SIMULATION



- Simulation de points stabilisés chargés :
  - ✓ courbe de pleine charge

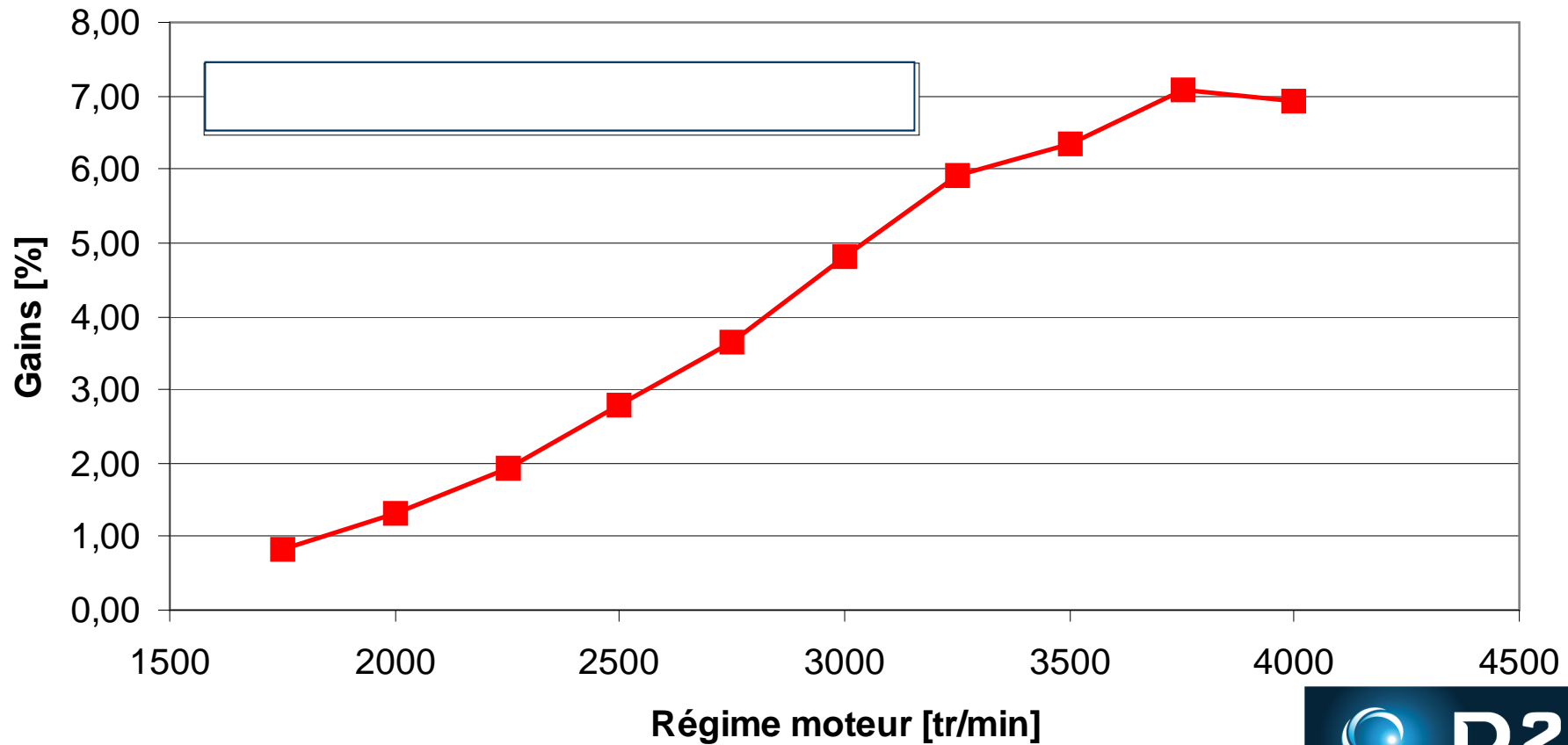
| Nmot     | tr/min | 2000 | 2250 | 2500 | 2750 | 3000 | 3250 | 3501 | 3750 | 4000 |
|----------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PME      | bar    | 19,3 | 19,1 | 18,7 | 18,4 | 17,9 | 17,3 | 16,6 | 15,9 | 15,2 |
| P2       | bar    | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  |
| Richesse | -      | 0,79 | 0,78 | 0,77 | 0,78 | 0,76 | 0,73 | 0,72 | 0,73 | 0,74 |



Your powertrain solution

# TURBOCOMPOUND APPLIQUE A LA SERIE AUTOMOBILE SIMULATION

## Gains en performance sur points de puissance



# ***Conclusion turbo-compound série automobile***

## Avantages:

- Gains en rendement et puissance de l'ordre de 7% max en forte charge/haut régime
- Intégration facilitée dans un véhicule hybridé

## Inconvénients:

- Gains en rendement faible en utilisation faible charge ou faible régime (<2 %)
- Justification du coût du système par rapport au gain faible en rendement-consommation procuré sur une utilisation de type cycle normalisé (faible charge/faible régime).

## Intérêt du turbo-compoud:

Le système turbo-compound en automobile série trouvera son intérêt sur des applications chargées de type utilitaire ou utilisant des moteurs fortement chargés (fort « downsizing »).

# AGENDA

- I) CONTEXTE
- II) ETAT DE L'ART SYSTEME TURBOCOMPOUND
- III) APPLICATION TURBOCOMPOUND A LA COMPETITION AUTOMOBILE
- IV) AUTRES APPLICATIONS POTENTIELLES
- V) CONCLUSION



# CONCLUSION

Le système de turbo-compound procure des gains de rendement significatifs (de l'ordre de 10%) sur des moteurs fortement chargés.

L'électrification des véhicules et le développement des technologies de moteurs électriques à forte densité de puissance facilitera l'application du turbo-compound électrique et résoudra des problèmes complexes de transmission mécanique.

Le turbo-compound électrique trouvera donc son intérêt sur des applications de type compétition automobile, aéronautique, poids lourds et groupe électrogène principalement.

Rendez-vous est pris en 2014 en F1 pour une compétition technologique dont le cœur sera le système de turbo-compound électrique.