

Scénarios de mobilité et les difficultés de choix

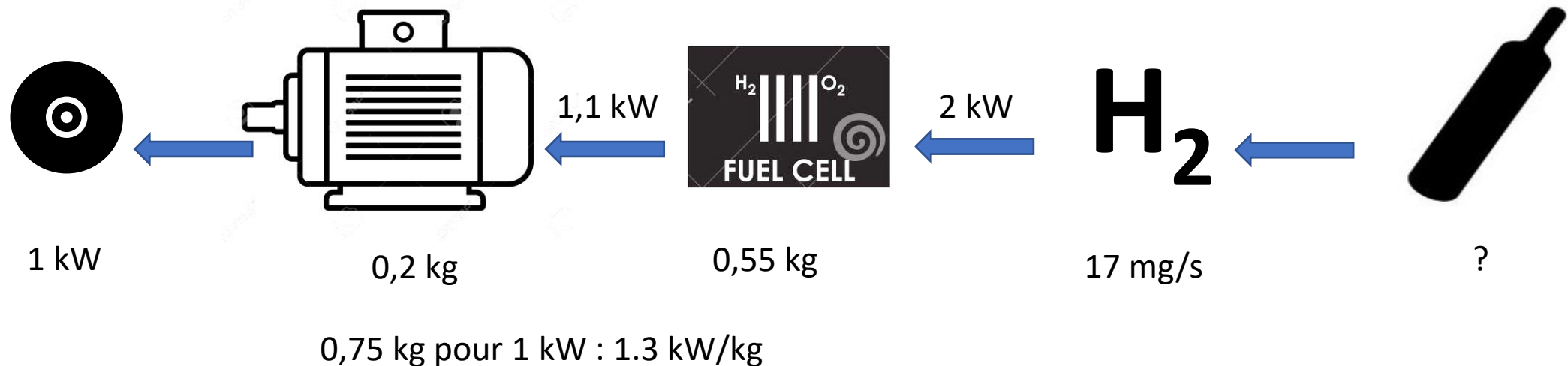
Pr. L Le Moyne

Institut Supérieur de
l'Automobile et des
Transports

- Véhicule :
 - Source d'énergie
 - Réservoir
 - convertisseur d'énergie
 - Moteur

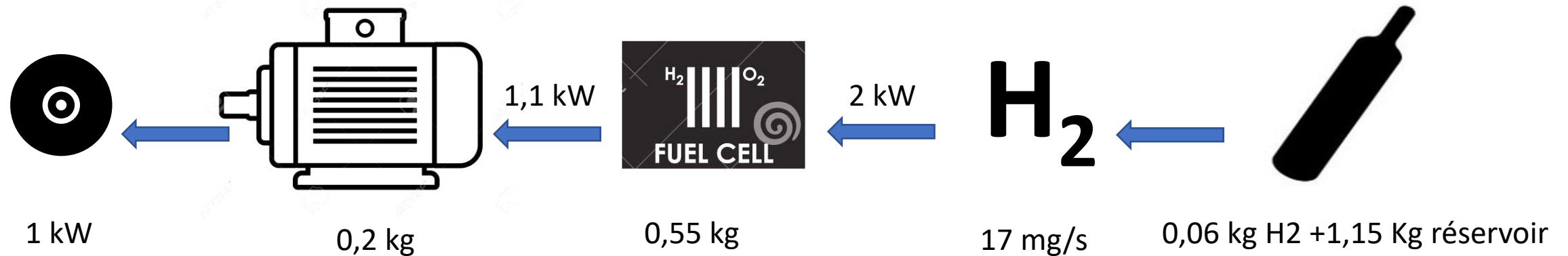
- Véhicule Hydrogène :

- Source d'énergie : H₂ à 700 bars, 120 MJ/kg (33 kW.h/kg)
- Réservoir : 5% de H₂ en masse
- convertisseur d'énergie : Pile à combustible 2 kW/kg, rendement 55%
- Moteur : électrique 5 kW/kg, rendement 90%



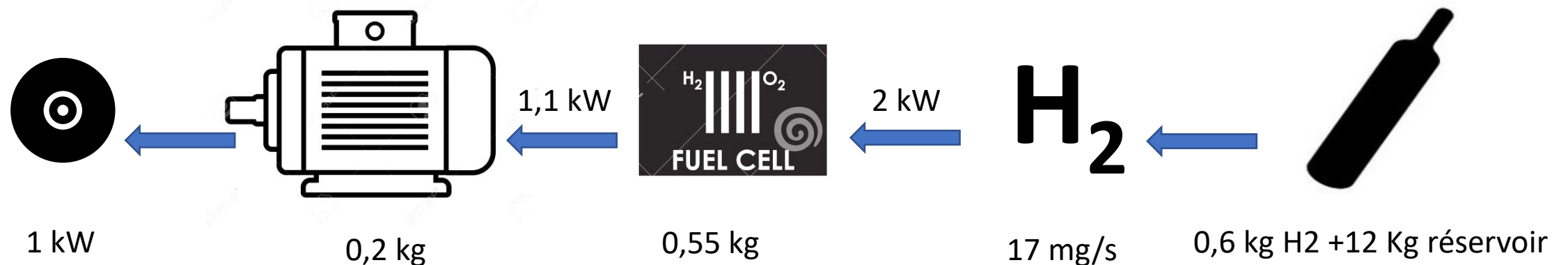
- Véhicule Hydrogène :

- Autonomie : 1h



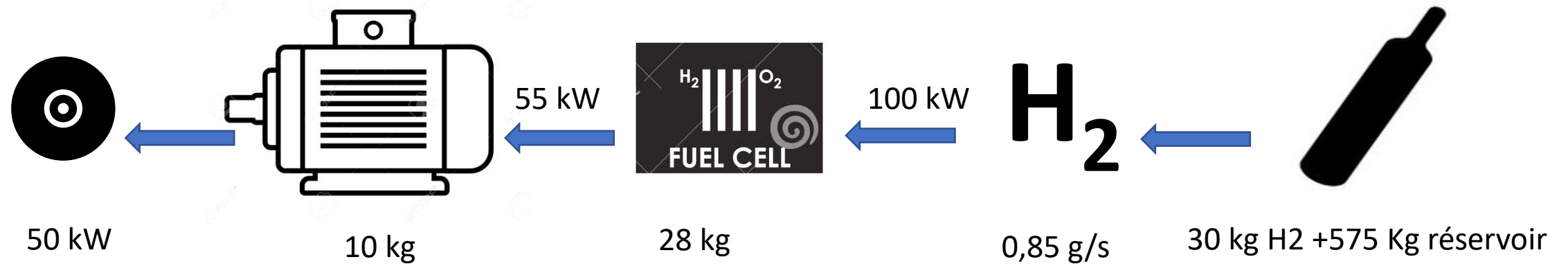
1.8 kg pour 1 kW : 0,6 kW/kg - Pendant une heure : 0,6 kW.h/kg

- Autonomie : 10 h



13 kg pour 1 kW : 0,09 kW/kg - Pendant 10 heures : 0,9 kW.h/kg

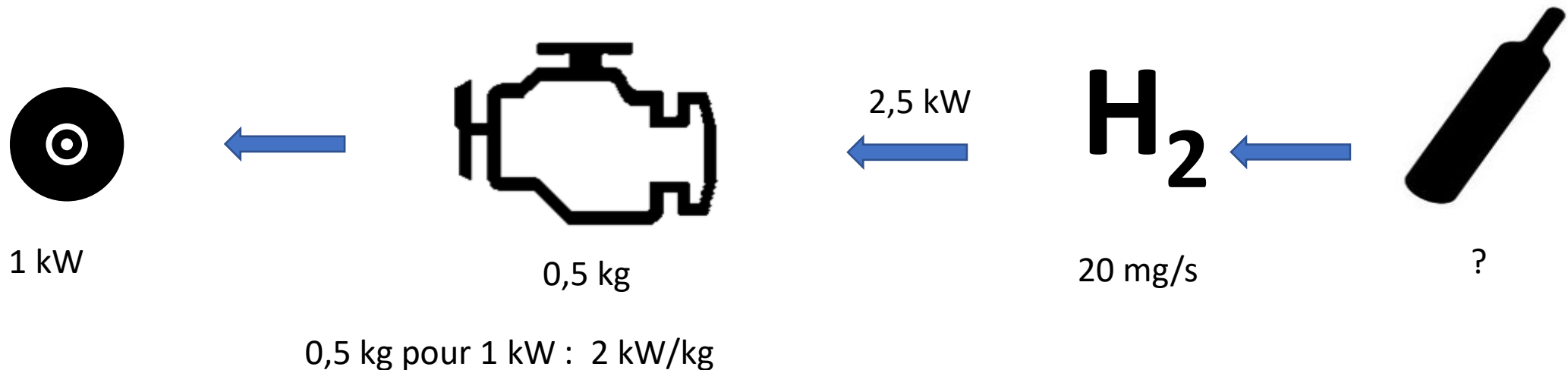
- Véhicule Hydrogène :
 - Autonomie : 10 h, puissance 50 kW



634 kg pour 50 kW : 0,09 kW/kg - Pendant 10 heures : 0,9 kW.h/kg

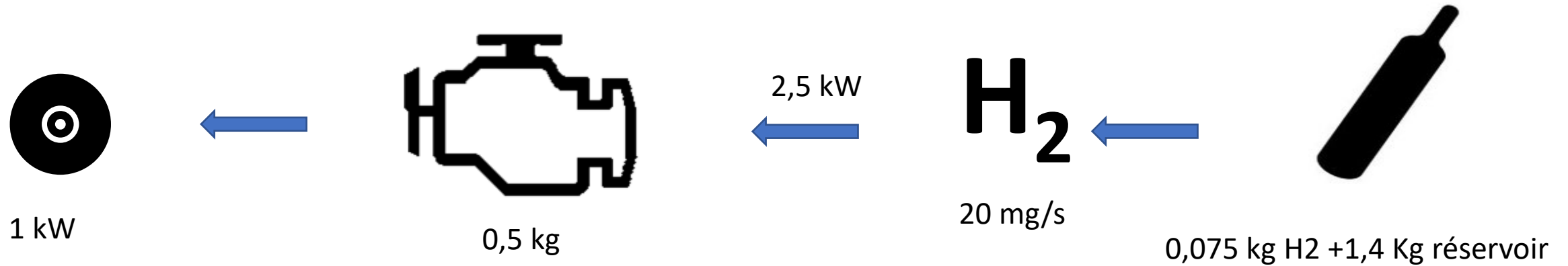
- Véhicule Réacteur Hydrogène :

- Source d'énergie : H₂ à 700 bars, 120 MJ/kg (33 kW.h/kg)
- Réservoir : 5% de H₂ en masse
- convertisseur d'énergie + Moteur : 2 kW/kg, rendement 40%



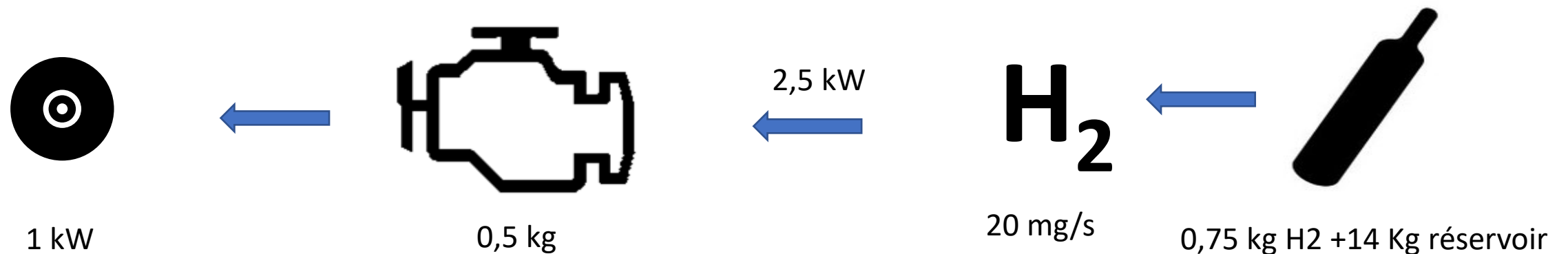
- Véhicule réacteur Hydrogène :

- Autonomie : 1h



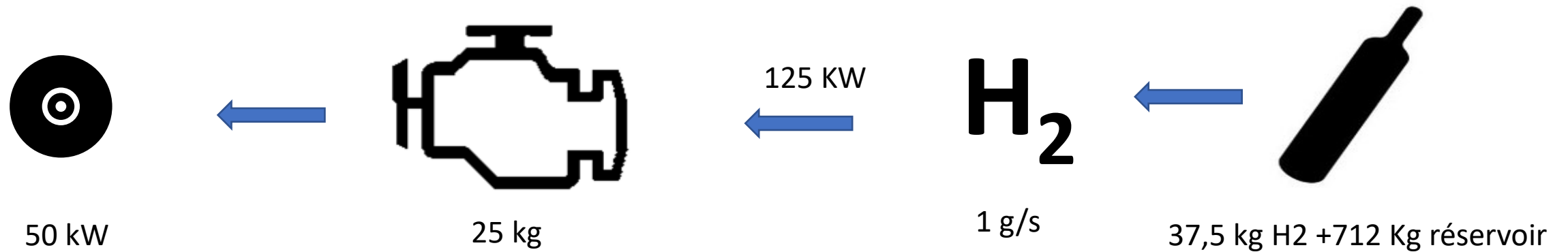
2 kg pour 1 kW : 0,5 kW/kg - Pendant une heure : 0,5 kW.h/kg

- Autonomie : 10 h



15,5 kg pour 1 kW : 0,06 kW/kg - Pendant 10 heures : 0,6 kW.h/kg

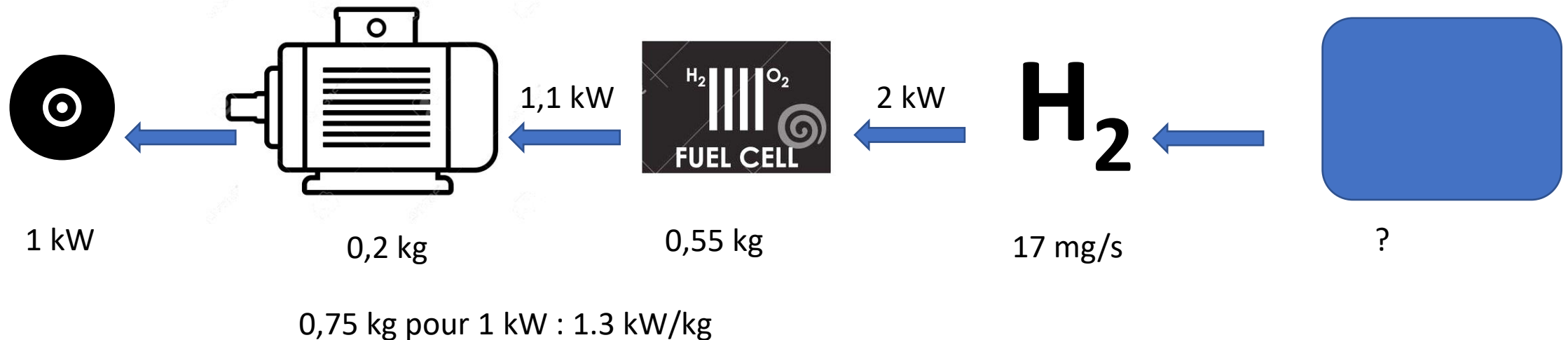
- Véhicule réacteur Hydrogène :
 - Autonomie : 10 h, puissance 50 KW



775 kg pour 50 kW : 0,06 kW/kg - Pendant 10 heures : 0,6 kW.h/kg

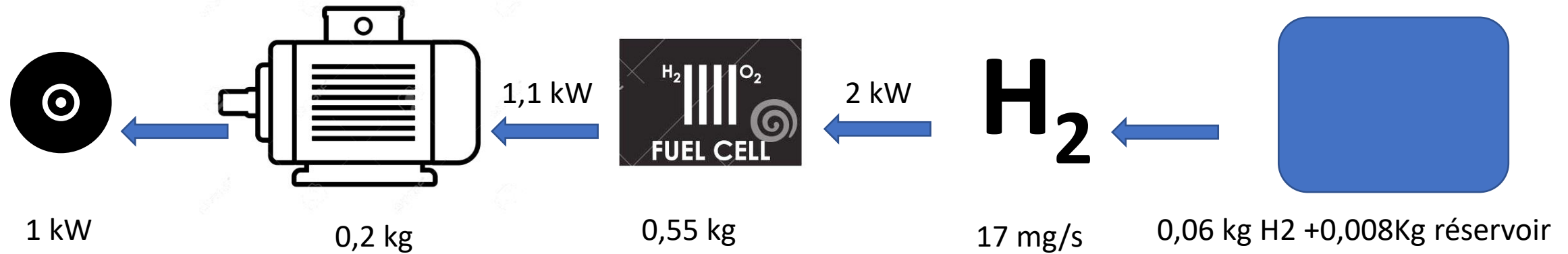
- Véhicule Hydrogène liquide:

- Source d'énergie : H₂ liquide, 120 MJ/kg (33 kW.h/kg)
- Réservoir : 88% de H₂ en masse (Ariane V)
- convertisseur d'énergie : Pile à combustible 2 kW/kg, rendement 55%
- Moteur : électrique 5 kW/kg, rendement 90%



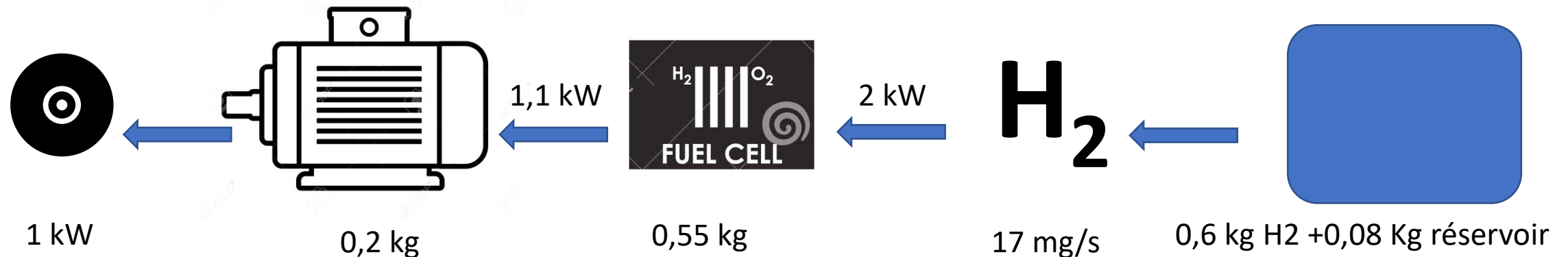
- Véhicule Hydrogène liquide:

- Autonomie : 1h



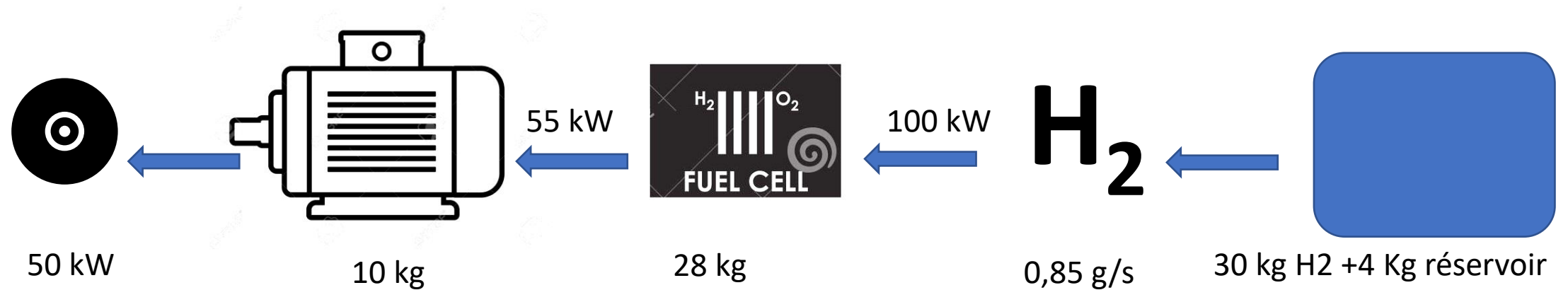
0,6 kg pour 1 kW : 1,8 kW/kg - Pendant une heure : 1,8 kW.h/kg

- Autonomie : 10 h



1,2 kg pour 1 kW : 0,9 kW/kg - Pendant 10 heures : 9 kW.h/kg

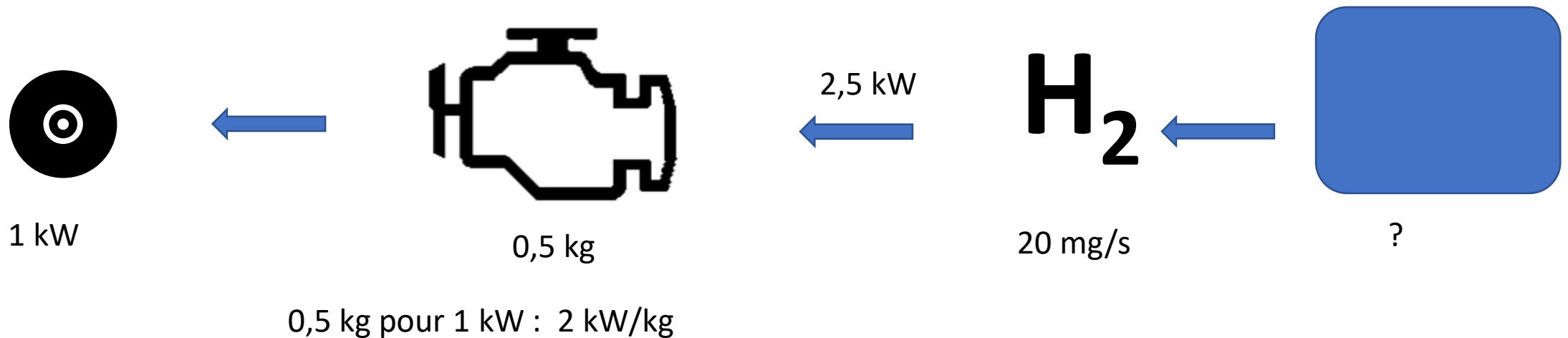
- Véhicule Hydrogène liquide:
 - Autonomie : 10 h, puissance 50 kW



62 kg pour 50 kW : 0,9 kW/kg - Pendant 10 heures : 9 kW.h/kg

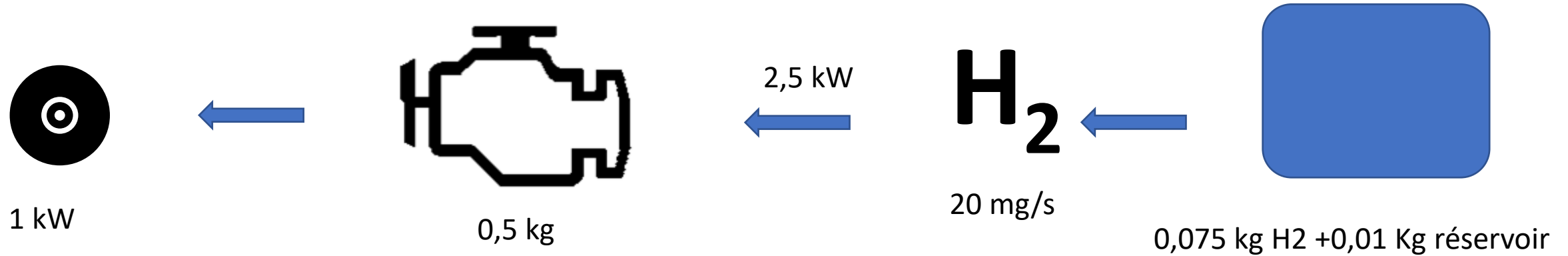
- Véhicule Réacteur Hydrogène liquide:

- Source d'énergie : H₂ liquide, 120 MJ/kg (33 kW.h/kg)
- Réservoir : 88% de H₂ en masse (Ariane V)
- convertisseur d'énergie + Moteur : 2 kW/kg, rendement 40%



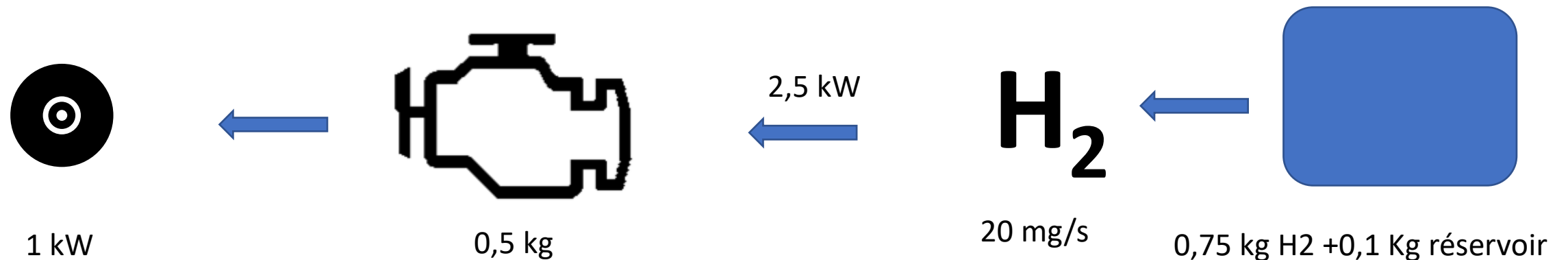
- Véhicule réacteur Hydrogène :

- Autonomie : 1h



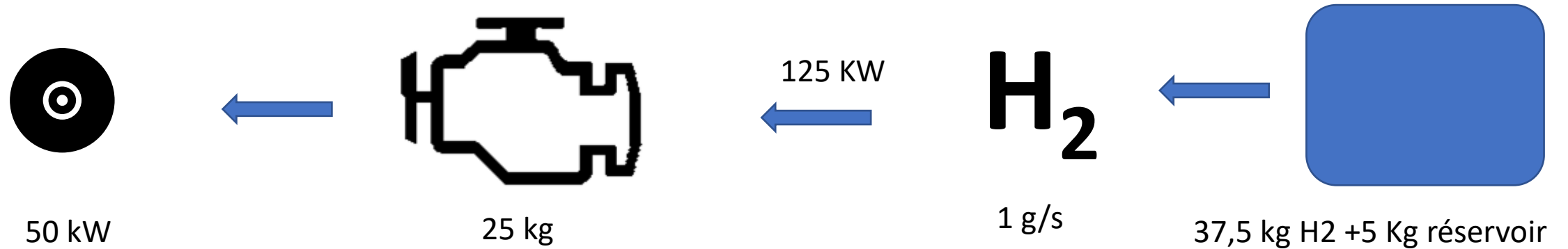
0,6 kg pour 1 kW : 1,7 kW/kg - Pendant une heure : 1,7 kW.h/kg

- Autonomie : 10 h



1,3 kg pour 1 kW : 0,7 kW/kg - Pendant 10 heures : 7 kW.h/kg

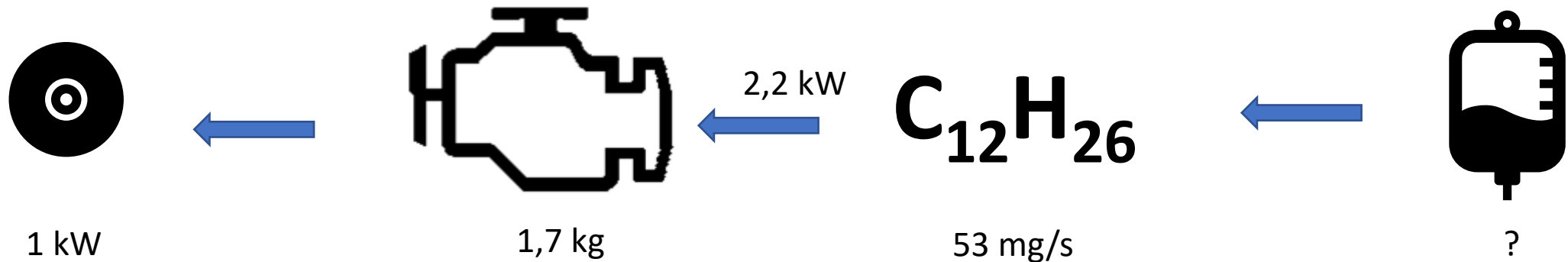
- Véhicule réacteur Hydrogène :
 - Autonomie : 10 h, puissance 50 KW



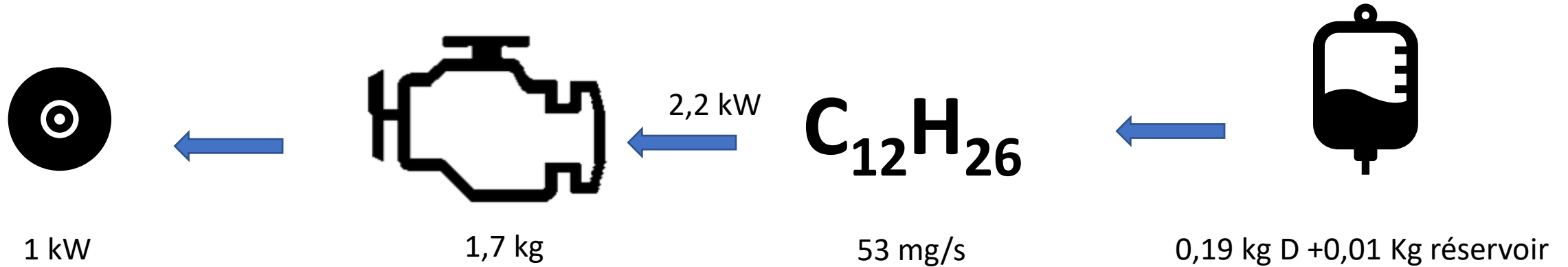
67 kg pour 50 kW : 0,7 kW/kg - Pendant 10 heures : 7 kW.h/kg

- Véhicule Diesel :

- Source d'énergie : Diesel, 42 MJ/kg (11 kW.h/kg)
- Réservoir : 95% de Diesel en masse
- convertisseur d'énergie + Moteur : 0,6 kW/kg, rendement 45%

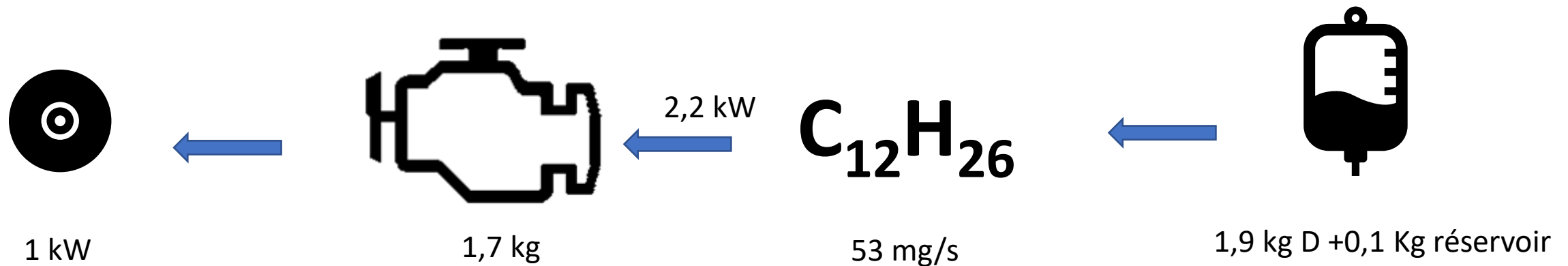


- Véhicule Diesel :
 - Autonomie : 1h



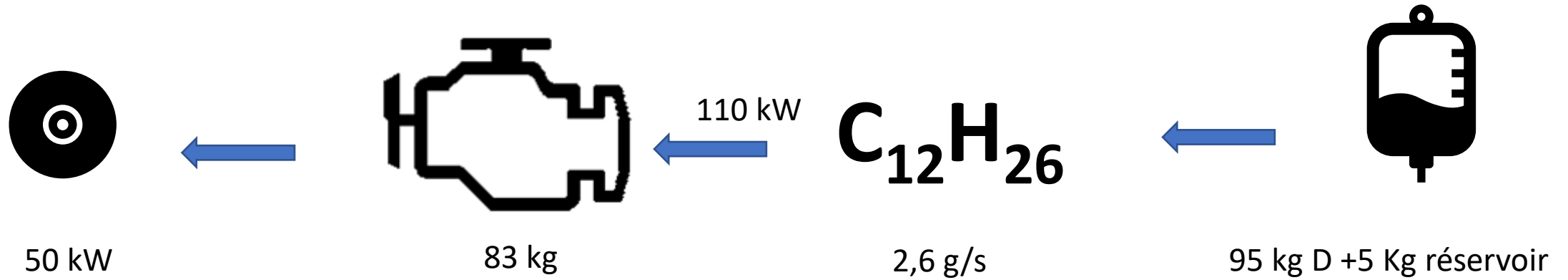
2 kg pour 1 kW : 0,5 kW/kg - Pendant une heure : 0,5 kW.h/kg

- Autonomie 10h



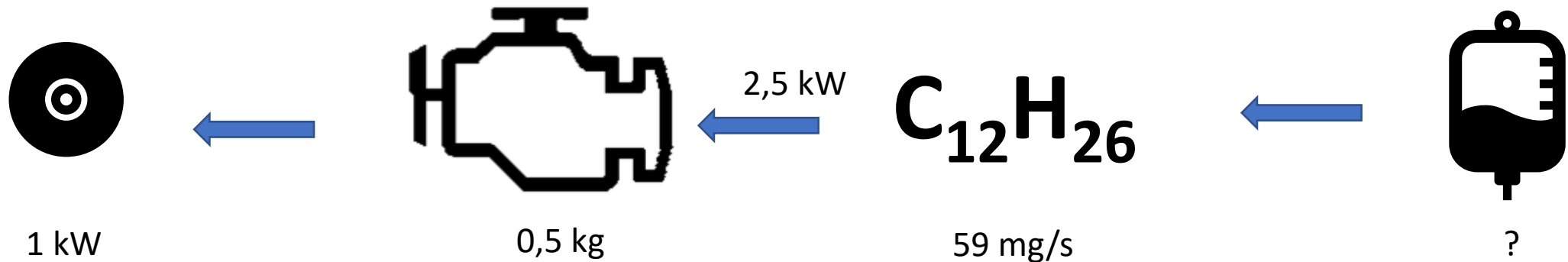
3,7 kg pour 1 kW : 0,27 kW/kg - Pendant 10 heures : 2,7 kW.h/kg

- Véhicule Diesel :
 - Autonomie 10h, puissance 50 kW



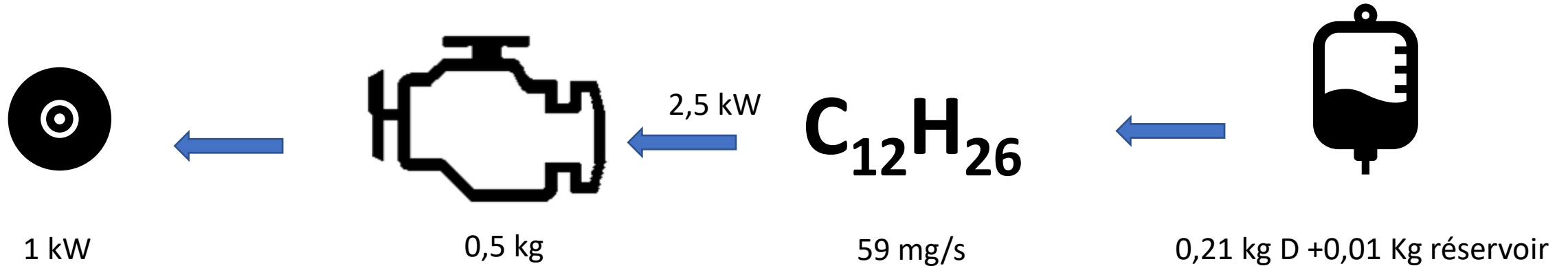
183 kg pour 50 kW : 0,27 kW/kg - Pendant 10 heures : 2,7 kW.h/kg

- Véhicule Kérosène (turboréacteur) :
 - Source d'énergie : Kérosène, 42 MJ/kg (11 kW.h/kg)
 - Réservoir : 95% de Diesel en masse
 - convertisseur d'énergie + Moteur : 2 kW/kg, rendement 40%



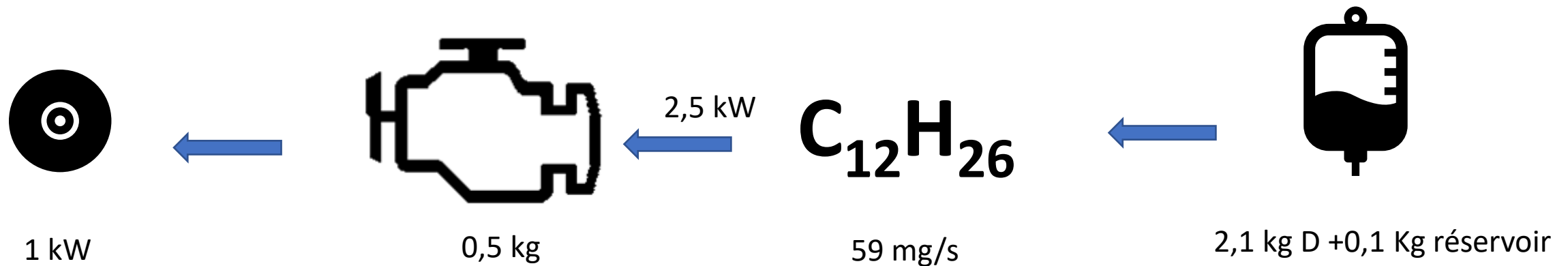
- Véhicule Kérosène (turbopropulseur) :

- Autonomie : 1h



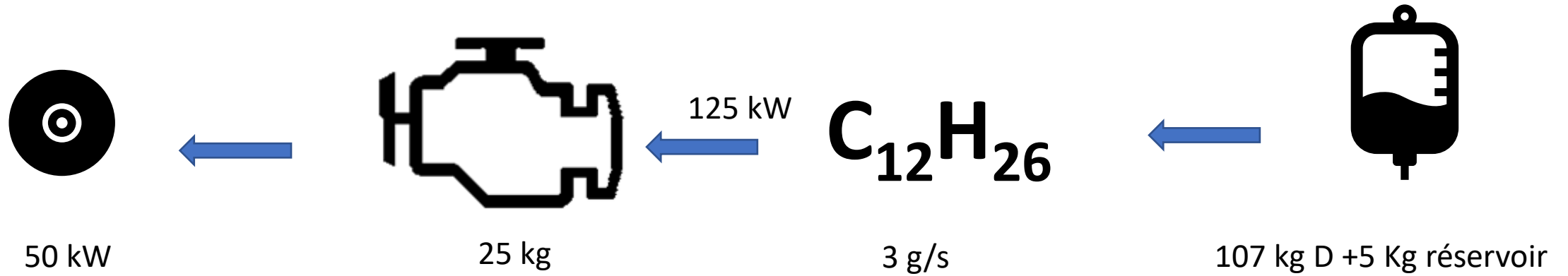
0,7 kg pour 1 kW : 1,4 kW/kg - Pendant une heure : 1,4 kW.h/kg

- Autonomie 10h



2,7 kg pour 1 kW : 0,36 kW/kg - Pendant 10 heures : 3,6 kW.h/kg

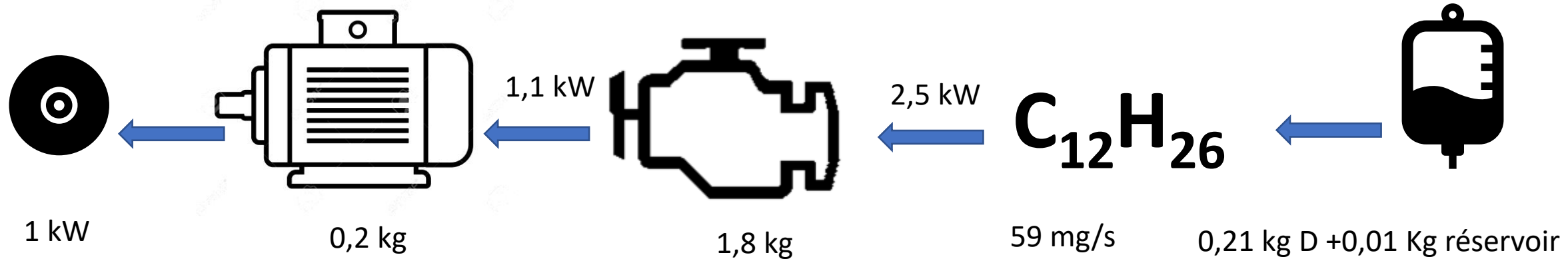
- Véhicule Kérosène (turboréacteur) :
 - Autonomie 10h, puissance 50 kW



137 kg pour 50 kW : 0,36 kW/kg - Pendant 10 heures : 3,6 kW.h/kg

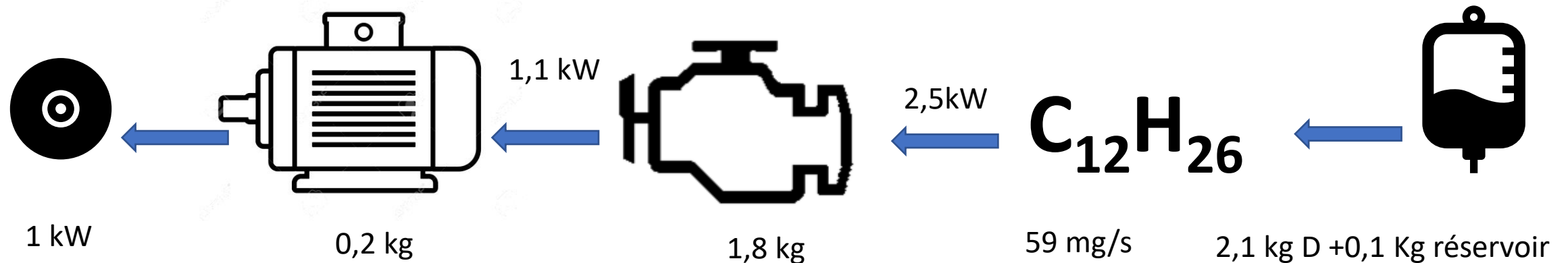
- Véhicule Hybride Diesel :

- Autonomie : 1h



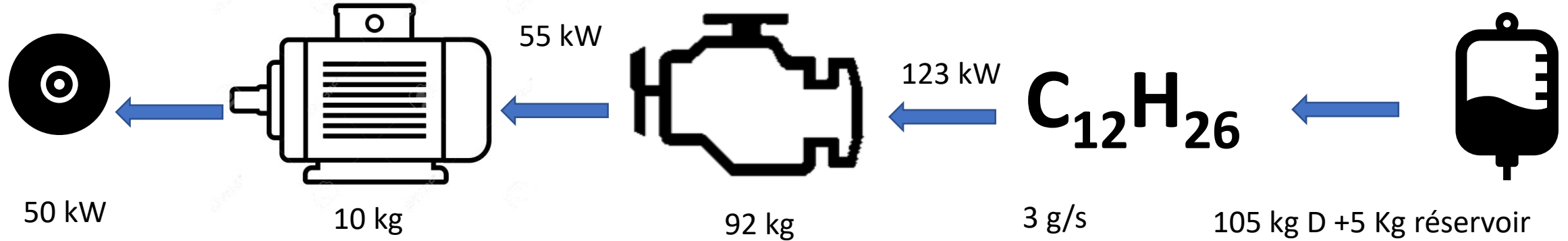
2 kg pour 1 kW : 0,5 kW/kg - Pendant une heure : 0,5 kW.h/kg

- Autonomie 10h



4 kg pour 1 kW : 0,27 kW/kg - Pendant 10 heures : 2,7 kW.h/kg

- Véhicule Hybride Diesel :
 - Autonomie 10h, puissance 50 kW



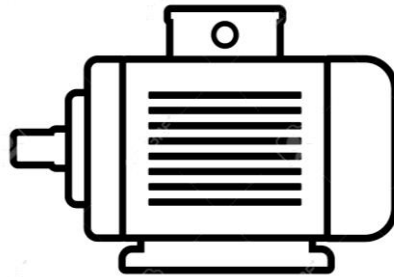
203 kg pour 50 kW : 0,27 kW/kg - Pendant 10 heures : 2,7 kW.h/kg

- Véhicule électrique :

- Source d'énergie + réservoir : Batterie Li ion, 0,7 MJ/kg (0,2 kW.h/kg)
- Moteur : 7 kW/kg, rendement 90%
- Autonomie : 1h



1 kW



0,2 kg

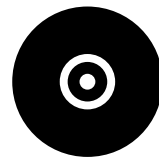
1,1 kW



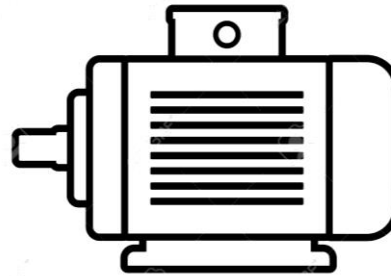
?

- Véhicule électrique :

- Autonomie : 1h



1 kW



0,2 kg



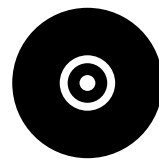
1,1 kW



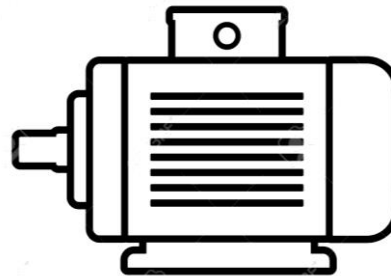
5,7 kg

6 kg pour 1 kW : 0,19 kW/kg - Pendant une heure : 0,19 kW.h/kg

- Autonomie : 10h



1 kW



0,2 kg



1,1 kW

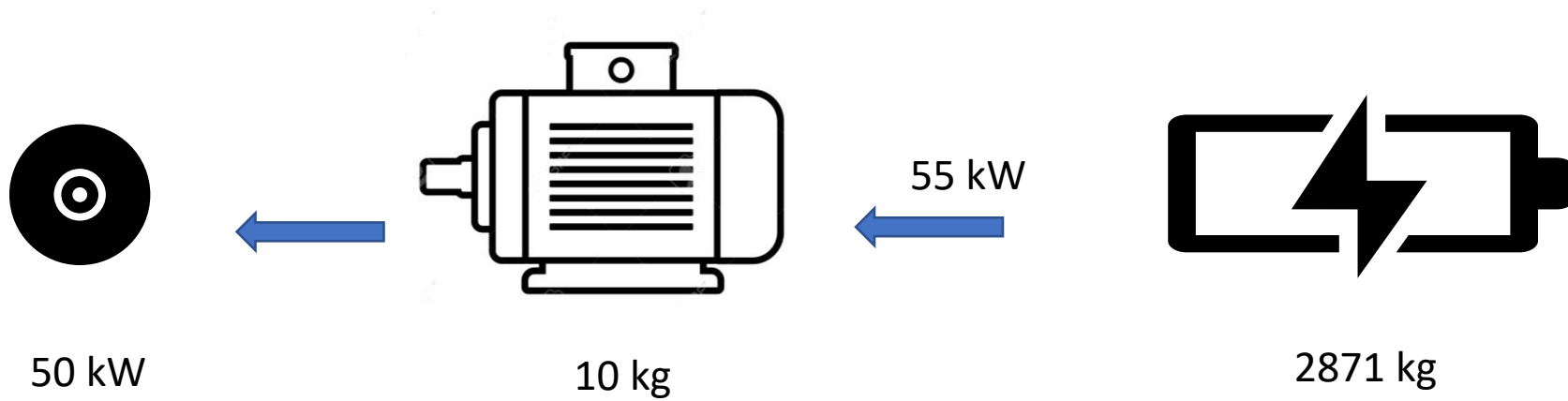


57 kg

57 kg pour 1 kW : 0,019 kW/kg - Pendant 10 heures : 0,19 kW.h/kg

- Véhicule électrique :

- Autonomie : 10h, puissance 50 kW



2868 kg pour 50 kW : 0,019 kW/kg - Pendant 10 heures : 0,19 kW.h/kg

10h et 50KW

1h et 1kW

[illegible]

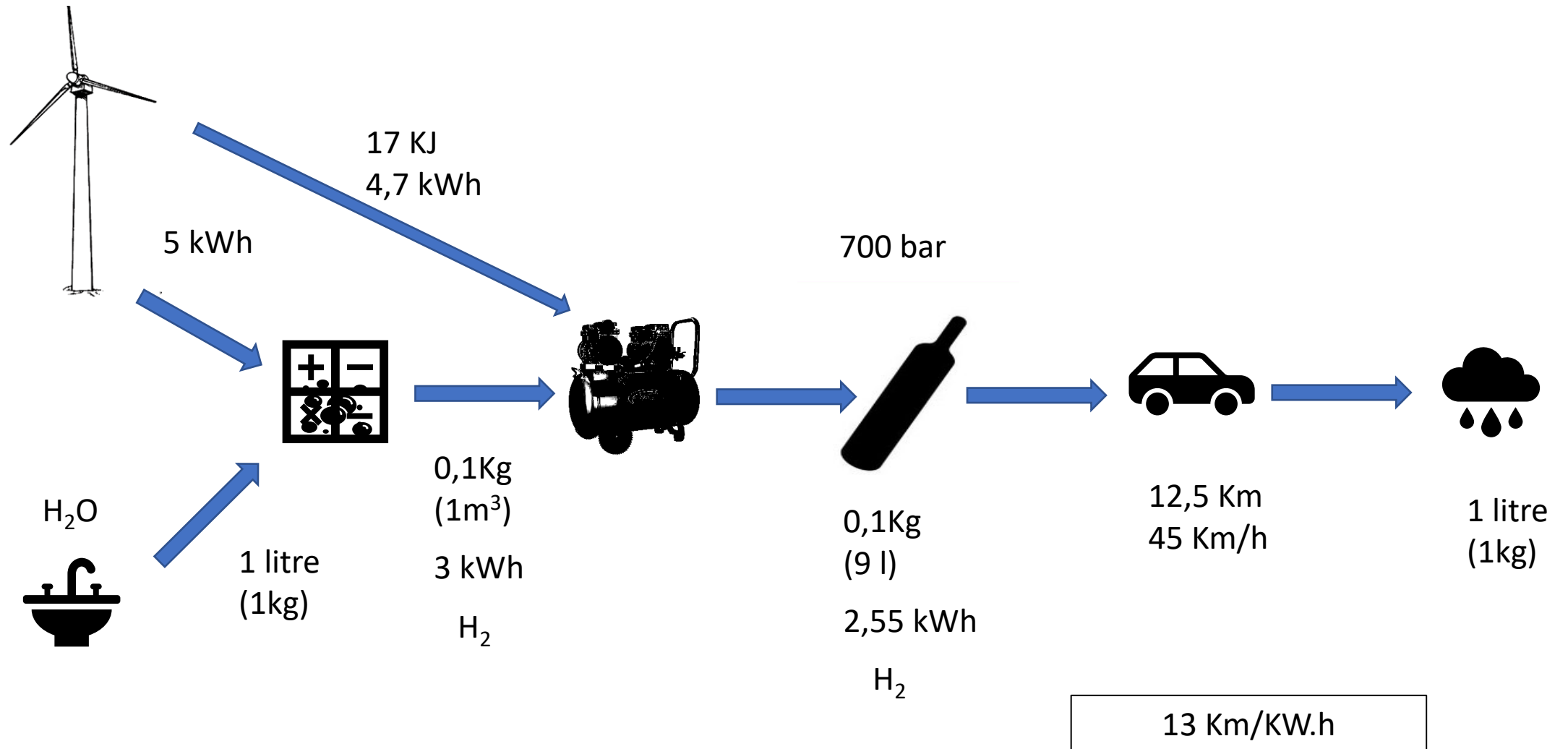
résumons

- Pour une autonomie de fonctionnement de 10 heures et une puissance de 50 KW :
 - Hydrogène liquide: 9 kW.h/kg, 0,9 KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 62 Kg
 - temps de charge : 4 min
 - Turboréacteur Kérosène: 3,6 KW.h/Kg, 0,36 W/Kg
 - poids de l'ensemble : 137 kg + insonorisation et amortissement vibrations
 - temps de charge : 5 min
 - Diesel : 1,7 kW.h/kg, 0,27 KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 183 kg + insonorisation et amortissement vibrations
 - temps de charge : 5 min
 - Hydrogène gaz: 0,9 kW.h/kg, 0,09KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 634 Kg
 - temps de charge : 4 min
 - Electrique : 0,19 KW.h/Kg, 0,019 KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 2868 Kg
 - temps de charge : 30 min

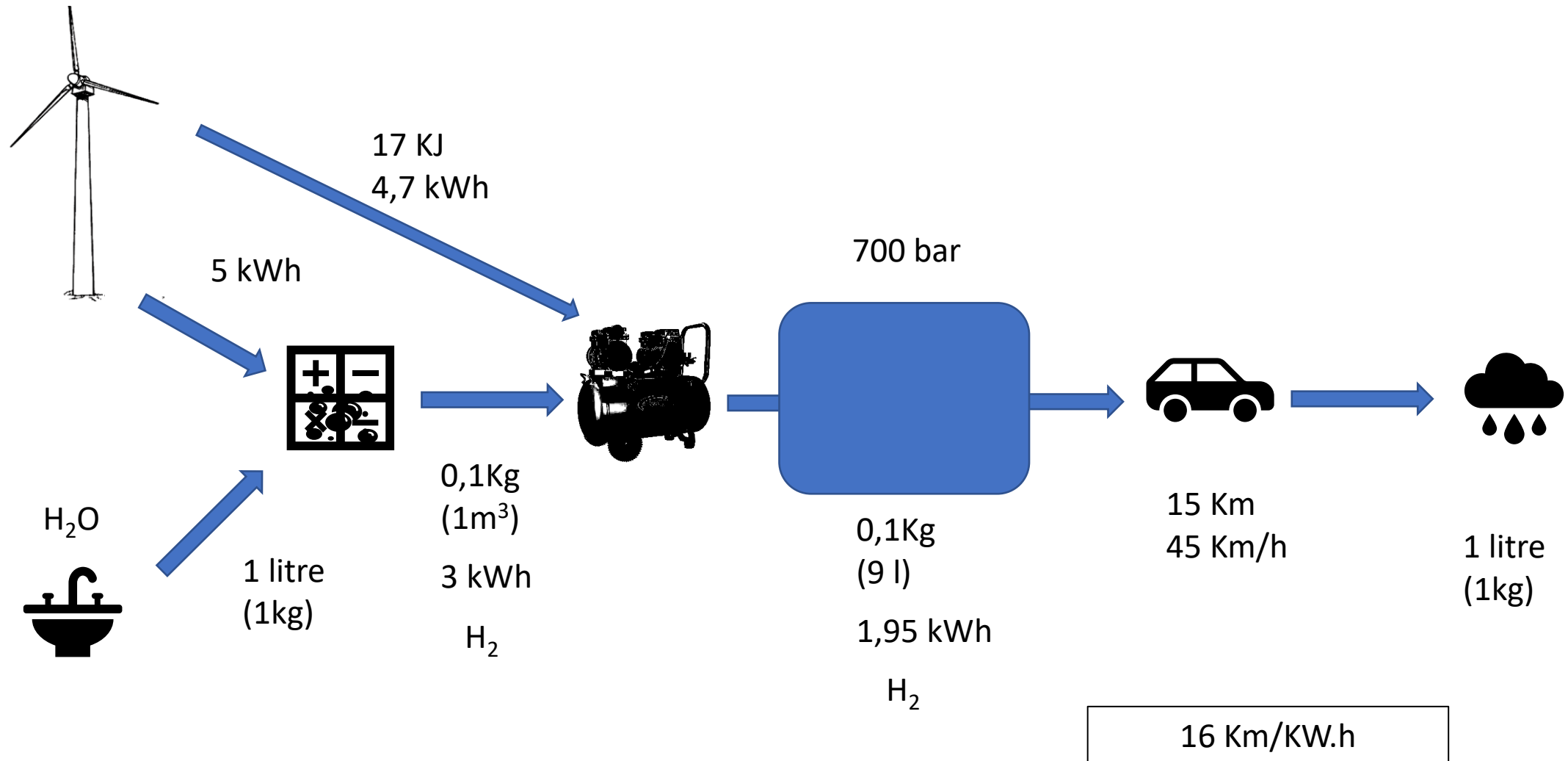
Résumons

- Pour une autonomie de fonctionnement de 1 heure et une puissance de 1 KW : usage urbain, recharge quotidienne
 - Hydrogène liquide: 1,8 kW.h/kg, 1,8 KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 75 Kg
 - temps de charge : 4 min
 - Turboréacteur Kérosène: 1,4 KW.h/Kg, 1,4 KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 0,7 kg + insonorisation et amortissement vibrations
 - temps de charge : 5 min
 - Hydrogène gaz: 0,6 kW.h/kg, 0,6 KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 1,8 Kg
 - temps de charge : 4 min
 - Diesel : 0,5 kW/kg, 0,5 KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 2 kg + insonorisation et amortissement vibrations
 - temps de charge : 2 min
 - Electrique : 0,19 kW/kg , 0,19KW/Kg
 - poids de l'ensemble : 6 Kg
 - temps de charge : 10 min (au domicile)

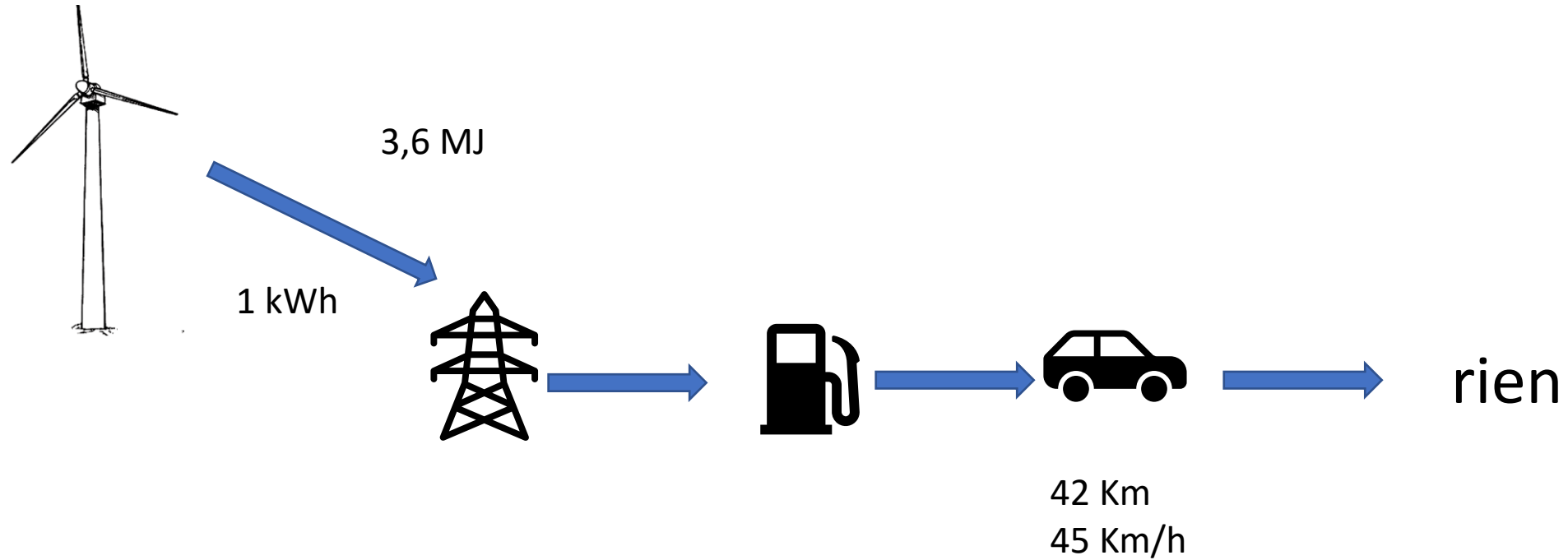
Cycle hydrogène



Cycle hydrogène

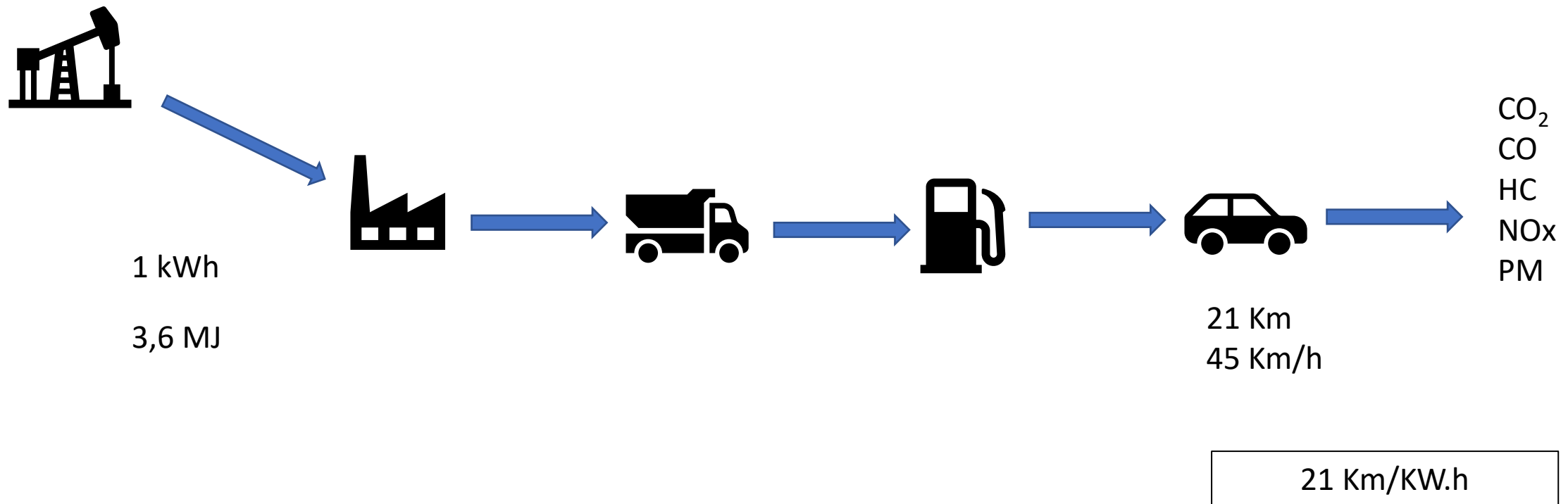


Cycle électrique

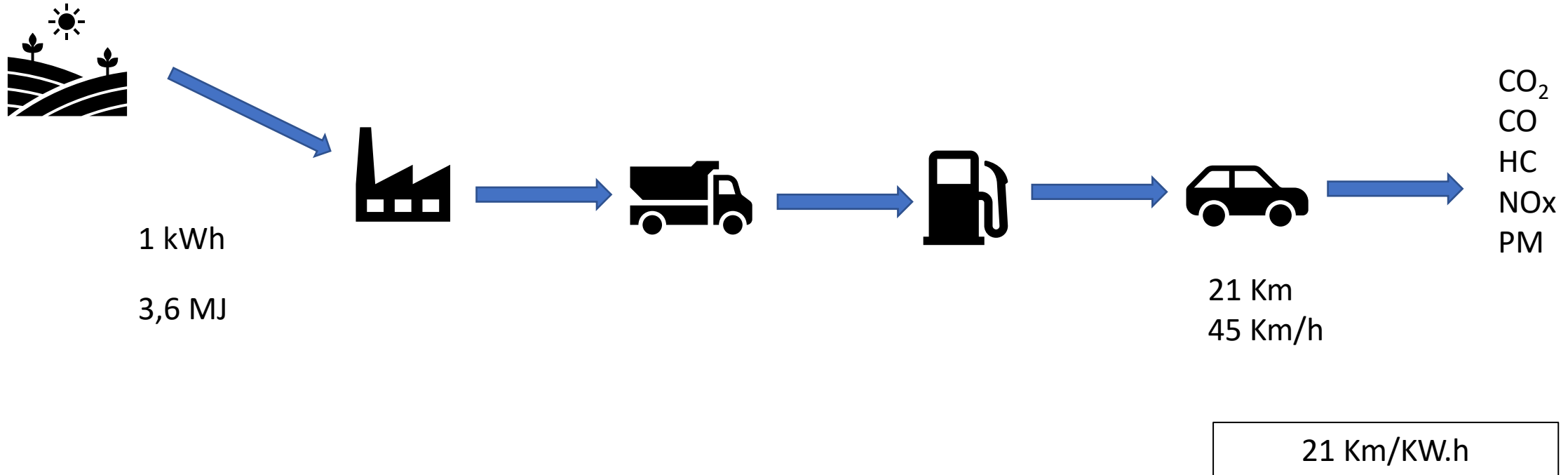


42 Km/KW.h

Cycle Diesel



Cycle Bio-Diesel



Quelle énergie pour 1 KW.h disponible ?

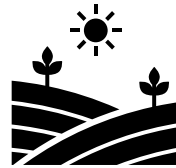
Taux de retour énergétique ou **EROEI** (« Energy Returned On Energy Invested »)
= (énergie exédentaire+énergie consommé)/énregie consommée
<= 1 si aucune énergie exédentaire n'est produite



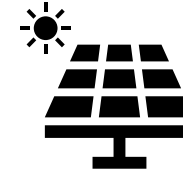
5 à 80



8 à 100



3 à 27



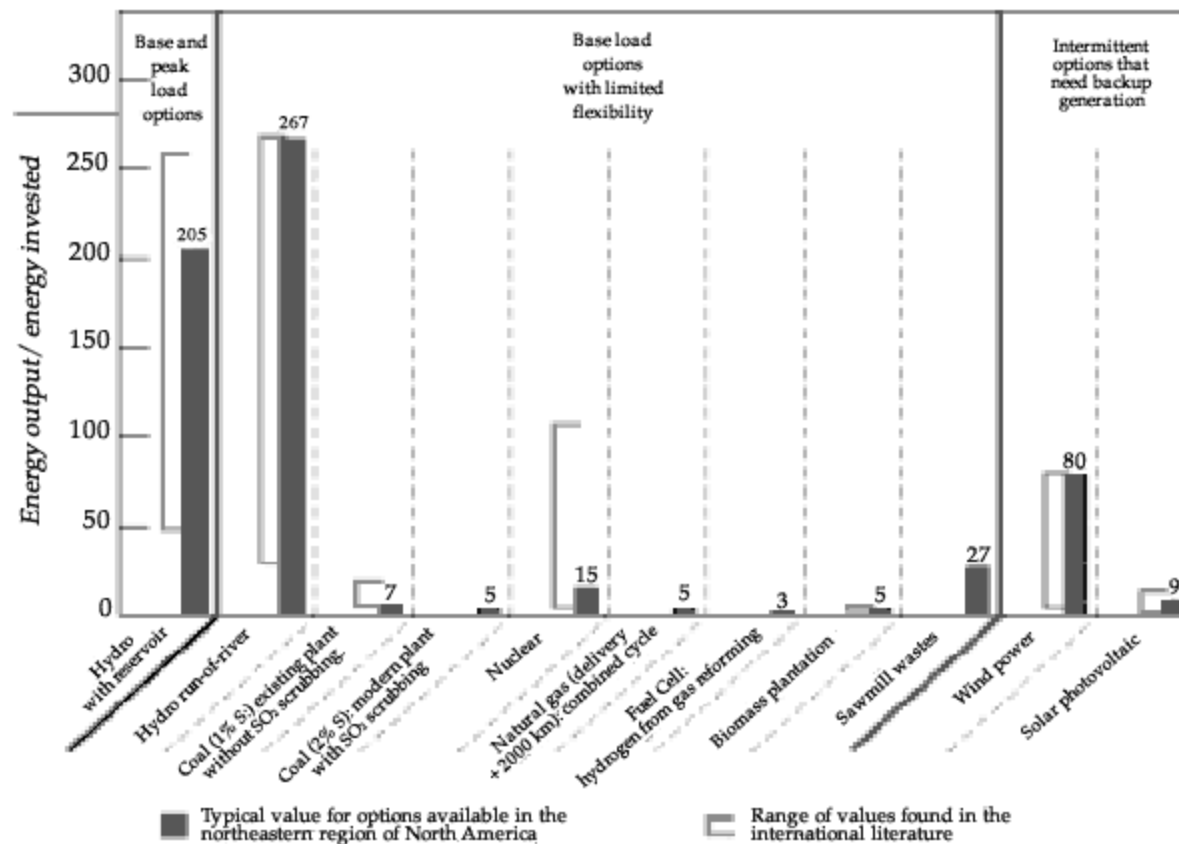
3 à 10

Nucléaire

5 à 100

Quelle énergie pour 1 KW disponible ?

(FIGURE 8A3) ENERGY PAYBACK RATIO OF ENERGY OPTIONS



Quelle énergie pour 1 KW disponible ?

Sources d'énergie	TRE Cleveland ³	TRE Elliott ⁴	TRE Hore-Lacy ⁵	TRE (Autres)
<u>Combustibles fossiles</u>				
<u>Pétrole</u>				
- Jusqu'à 1940	> 100			
- Jusqu'à 1970	23	50 - 100		
- 2005 (« Aujourd'hui »)	8			5 - 15 ³
<u>Charbon</u>				
- Jusqu'à 1950	80			
- Jusqu'à 1970	30	2 - 7	7 - 17	
<u>Gaz naturel</u>	1 - 5		5 - 6	
<u>Schistes bitumineux</u>	0,7 - 13,3			< 1 ?
<u>Énergie nucléaire</u>	5 - 100	5 - 100	10 - 60	< 1 ⁶
<u>Énergies renouvelables</u>				
<u>Biomasse</u>		3 - 5	5 - 27	
<u>Énergie hydroélectrique</u>	11,2	50 - 250	50 - 200	
<u>Énergie éolienne</u>		5 - 80	20	
<u>Énergie solaire</u>				
- Énergie solaire thermique	4,2			
- Photovoltaïque conventionnel	1,7 - 10	3 - 9	4 - 9	< 1
- Photovoltaïque à couches minces				25 - 80
<u>Éthanol</u>				
- De canne à sucre	0,8 - 1,7			0,6 - 1,2
- De maïs	1,3			
- De résidus de maïs	0,7 - 1,8			
<u>Méthanol</u> (de bois)	2,6			

Quels autres critères ?

• Utilisation de la terre

- GLOBAL LANDOUTLOOK WORKING PAPER, ENERGY AND LAND USE , September 2017, IRENA, ONU

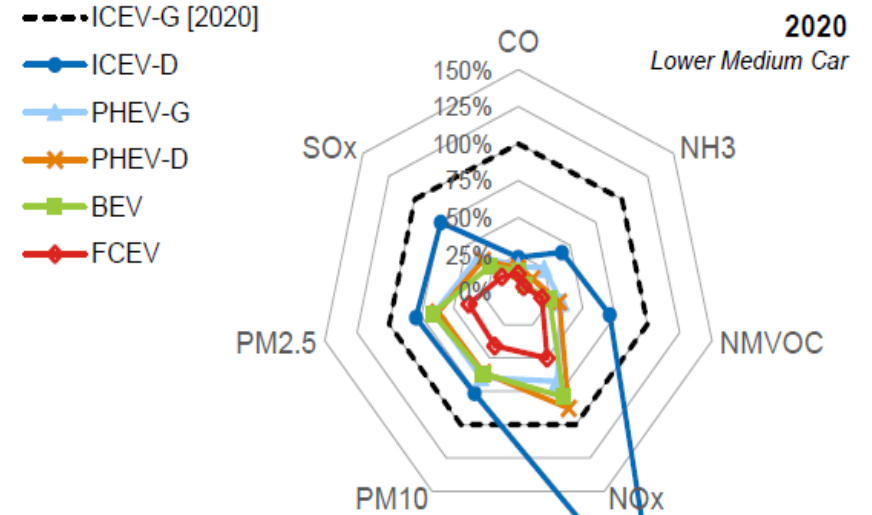
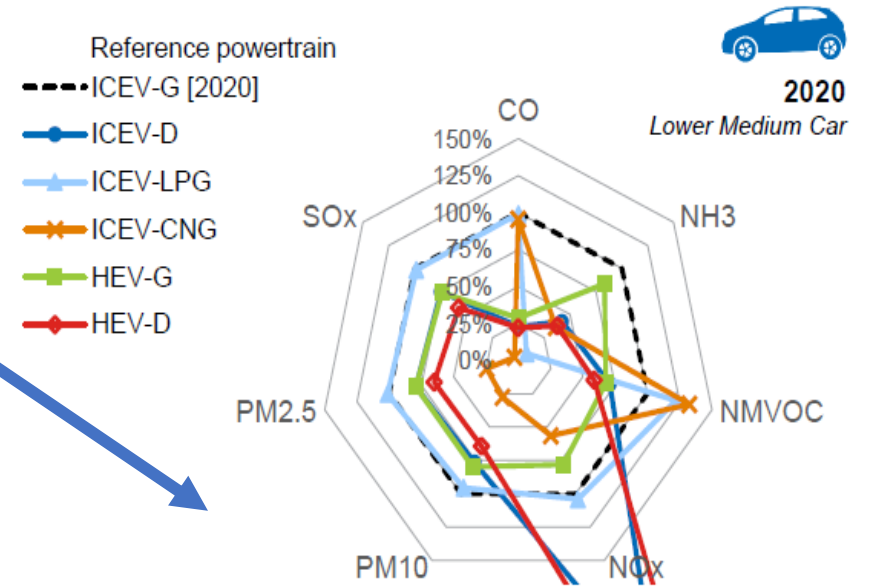
			Land use intensity [m²/MWh]				
Product	Primary energy source		U.S. data ^{a)}	U.S. data ^{b)}	EU data ^{c)}	UNEP ^{d)}	Typical ^{e)}
Electricity	Nuclear		0.1	0.1	1.0		0.1
	Natural gas		1.0	0.3	0.1	0.2	0.2
	Coal	Underground	0.6	0.2	0.2		0.2
		Surface ("open-cast")	8.2	0.2	0.4	15.0	5.0
	Renewables	Wind	1.3	1.0	0.7	0.3	1.0
		Geothermal	5.1		2.5	0.3	2.5
		Hydropower (large dams)	16.9	4.1	3.5	3.3	10
		Solar photovoltaic	15.0	0.3	8.7	13.0	10
		Solar – concentrated solar power	19.3		7.8	14.0	15
		Biomass (from crops)	810	13	450		500
Liquid Fuel	Fossil oil		0.6		0.1		0.4
	Biofuels	Corn (maize)	237		220		230
		Sugarcane (from juice)	274		239		250
		Sugarcane (residue)					0.1
		Soybean	296		479		400
		Cellulose, short rotation coppice	565		410		500
		Cellulose, residue			0.10		0.1

Environm

Impact category	Abbr.	Indicator and unit
Climate change	GWP	Greenhouse gas emissions GWP100 in CO ₂ eq
Energy consumption	CED	Cumulative energy demand in MJ (fossil, nuclear and renewable)
Acidification	AcidP	Acidification potential in SO ₂ eq
Eutrophication	EutroP	Eutrophication potential in PO ₄ ³⁻ eq
Photochemical ozone formation	POCP	Photochemical Ozone Creation Potential POCP in NMVOC eq
Ozone depletion	ODP	ODP in R11 eq
Ionising radiation	IRP	Ionising radiation potentials in U235 eq
Particulate matter	PMF	Particulate matter formation in PM2.5 eq
Human toxicity, cancer and non-cancer	HTP	Comparative Toxic Unit for Human Health in CTUh
Ecotoxicity, freshwater	ETP_FA	Comparative Toxic Unit for ecosystems in CTUe
Resource depletion - minerals and metals	ARD_MM	ADP ultimate reserves in Sb eq
Resource depletion – fossil energy carriers	ARD_FE	ADP fossil in MJ
Land use	LandU	Land occupation in m ² *a
Water scarcity	WaterS	Scarcity-adjusted water use in m ³

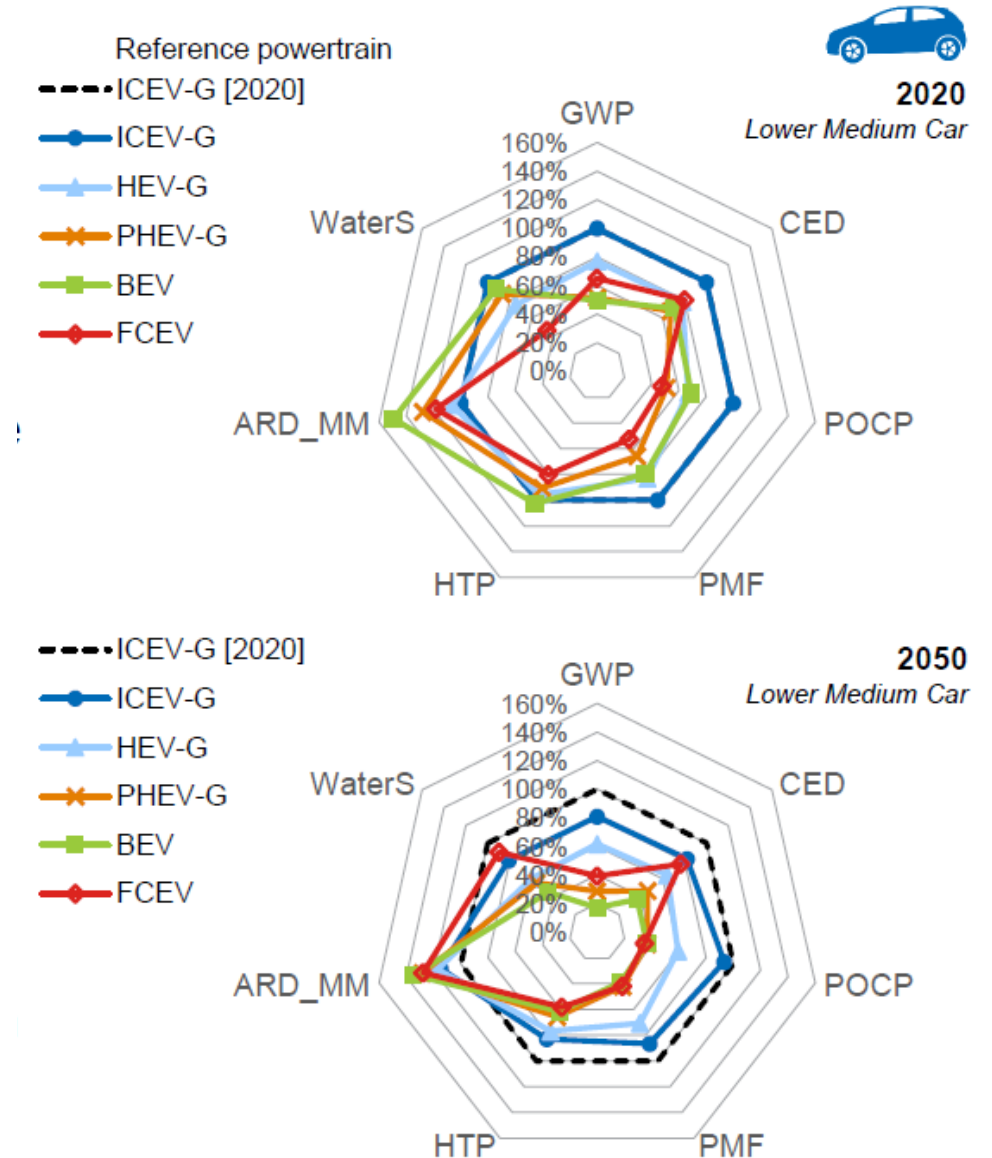
Quels autres critères ?

- Les polluants (CO, NH3, HC, NOx, PM10, PM2.5, Sox, NMVOC)
- Demande énergétique cumulée (CED)
- Potentiel de génération d'ozone photochimique (POCD)
- Formation de particules (PMF)
- Potentiel de Toxicité pour l'homme (HTP)
- Déplétion abiotique de ressources, minéraux et métaux : ARD_MM
- Raréfaction de l'eau : WaterS
- Potentiel d'acidification : AcidP
- Potentiel d'eutrophication : EutroP
- Potentiel de déplétion d'ozone ; ODP
- Potentiel de toxification de l'eau potable : ETP_FA
- Potentiel de déplétion abiotique de ressources, énergie fossile : ARD_FE
- Occupation des sols : LandU



Quels autres critères ?

- Les polluants (CO, NH3, HC, NOx, PM10, PM2.5, SOx)
- Demande énergétique cumulée (CED)
- Potentiel de génération d'ozone photochimique (POCD)
- Formation de particules (PMF)
- Potentiel de Toxicité pour l'homme (HTP)
- Déplétion abiotique de ressources, minéraux et métaux : ARD_MM
- Raréfaction de l'eau : WaterS
- Potentiel d'acidification : AcidP
- Potentiel d'eutrophication : EutroP
- Potentiel de déplétion d'ozone ; ODP
- Potentiel de toxification de l'eau potable : ETP_FA
- Potentiel de déplétion abiotique de ressources, énergie fossile : ARD_FE
- Occupation des sols : LandU



Quels autres critères ?

- Les polluants (CO, NH3, HC, NOx, PM10, PM2.5, SOx)
- Demande énergétique cumulée (CED)
- Potentiel de génération d'ozone photochimique (POCD)
- Formation de particules (PMF)
- Potentiel de Toxicité pour l'homme (HTP)
- Déplétion abiotique de ressources, minéraux et métaux : ARD_MM
- Raréfaction de l'eau : WaterS
- Potentiel d'acidification : AcidP
- Potentiel d'eutrophication : EutroP
- Potentiel de déplétion d'ozone ; ODP
- Potentiel de toxification de l'eau potable : ETP_FA
- Potentiel de déplétion abiotique de ressources, énergie fossile : ARD_FE
- Occupation des sols : LandU

