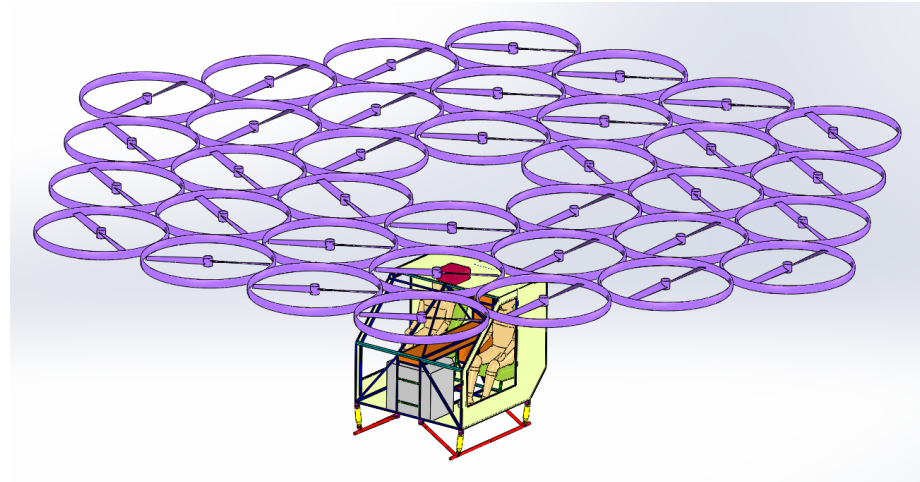


Suivi de projet

Intégration moteurs et énergie du Mini-Bee

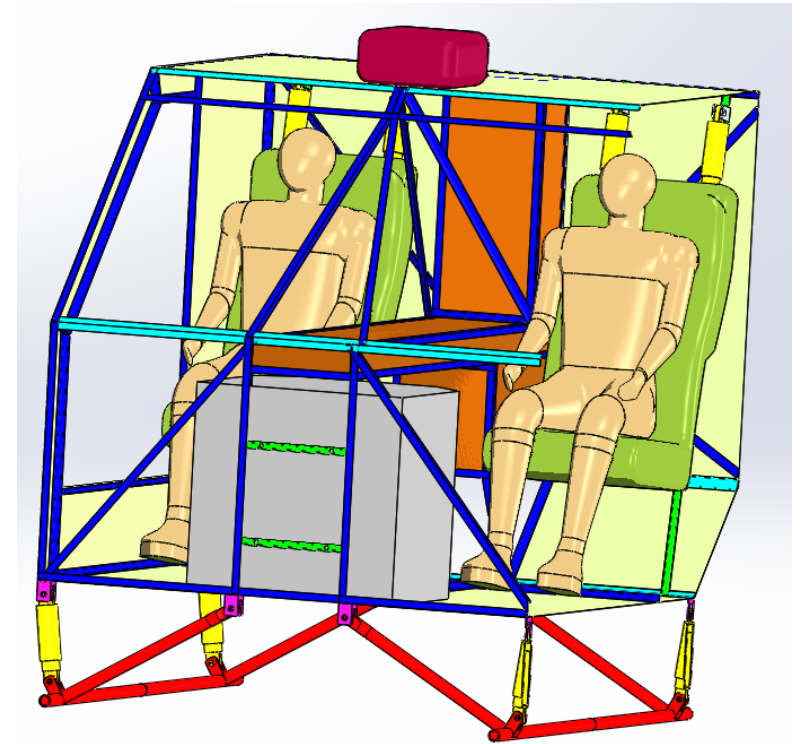


Année 2021-2022

Laurine TOUTIN - Bastien BRON – Guillaume TIGÉ

1. Contexte
 - a. Objectifs
 - b. Liens avec les autres projets
 - c. Diagramme de Gantt
2. Cahier des charges
3. Etude des performances de différentes configurations de chaîne de puissance
4. Etude de la structure propulsive
5. Scénarii de vol
6. Conclusion

- Piloté
- VTOL
- 2 PAX
- Moteur à piston Rotax 915is
- Démontable rapidement et facilement
- Tenir au sein de conteneurs LD3 (soute d'avion)
- Se déplacer rapidement
- Coûts modérés de l'appareil
- Facilement pilotable
- Projet fortement collaboratif



Cabine du Mini-Bee réalisée par l'ESTACA –
ASA -2022



- Définir les besoins énergétiques et le cahier des charges du mini-bee
- Evaluer les performances des différentes configurations électriques
- Choisir entre une machine triphasée asynchrone et une **machine hexaphasée synchrone**
- Formaliser les plans de vol du mini-bee



Contrôle de vol d'un multicoptère hybride et tests des moteurs asynchrones

Communiquer les différentes configurations électriques



CentraleSupélec

Modélisation électrique de la chaîne de propulsion



Fournir la configuration de l'ensemble propulsif (hélices)



Structure de l'ensemble propulsif



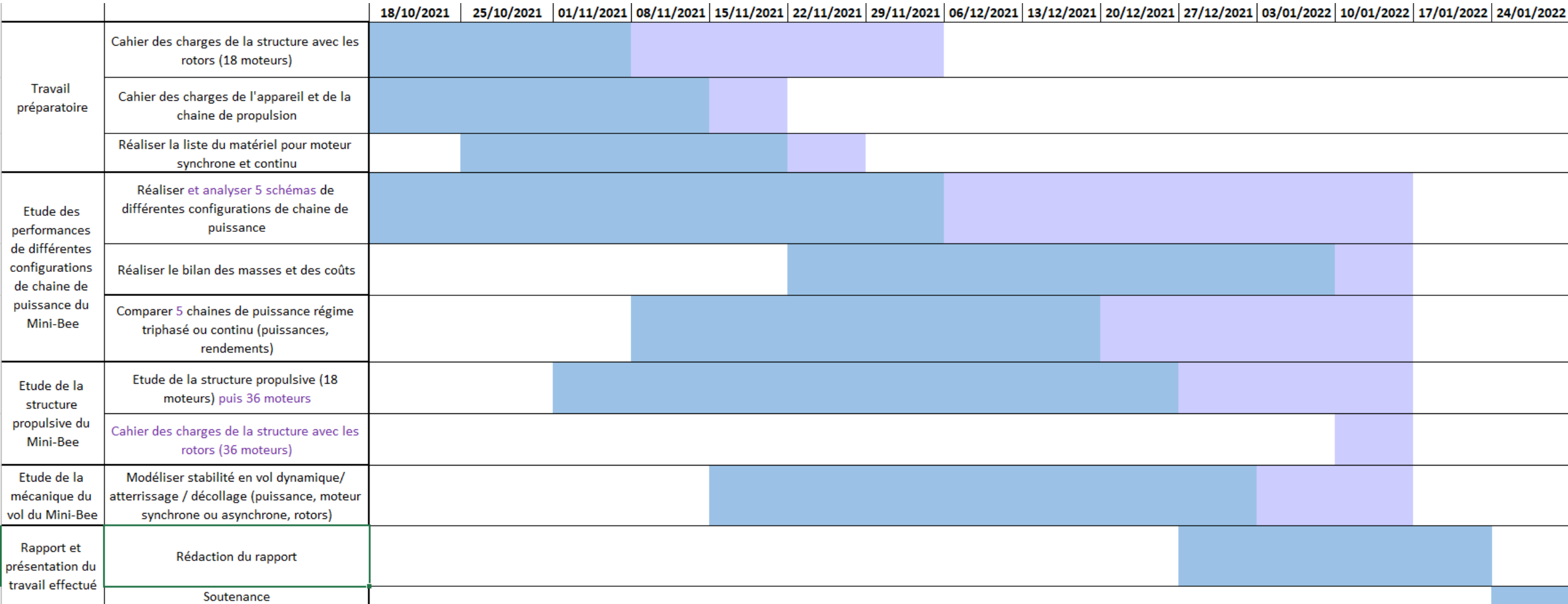
Dimensionnement structurel

Communiquer les différentes configurations de la répartition des masses de la chaîne de puissance

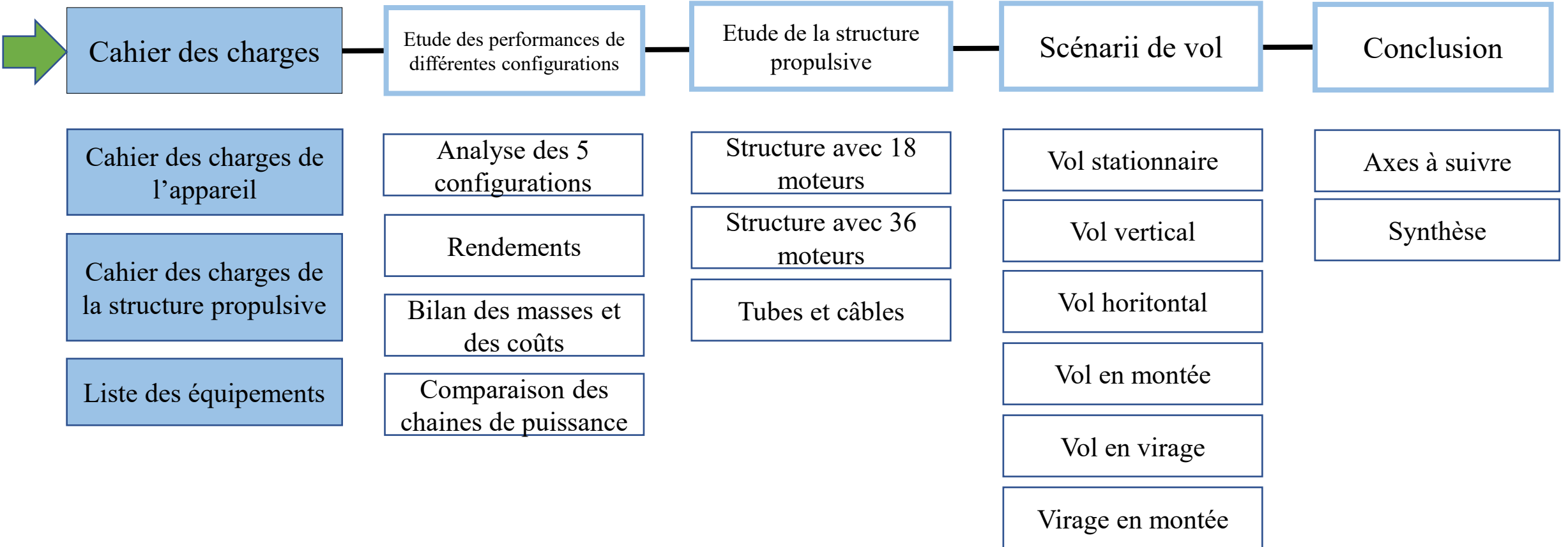


Spécialité architecture des structures aéronautiques

Structure et aménagement du Mini-Bee



En bleu les dates prévisionnelles et en violet les dates réelles
Les écritures violettes correspondent aux tâches ajoutées durant le projet



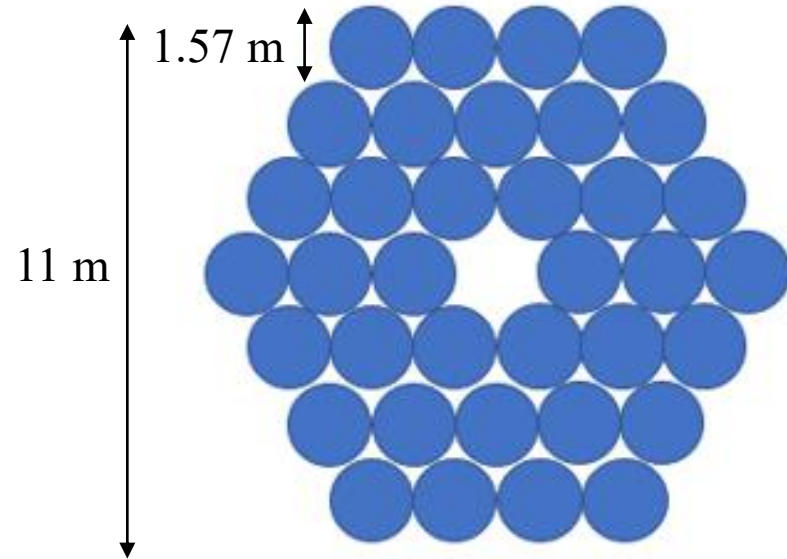
500 km franchissables

2 PASSAGERS

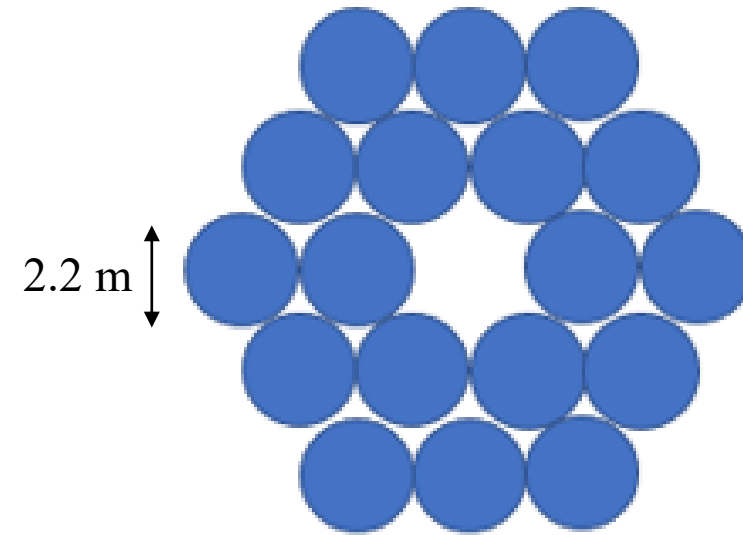
36 HELICES

300 000 €

Données du Mini-Bee		
Nombre de rotors	18 rotors	36 rotors
Nombre de passagers	2	2
Vitesse verticale en m/s	4	4
Diamètre de la surface prise par une pale en m	2.2	1.57
Coût total en euros	300 000	300 000
Altitude maximale en ft	14 000	14 000
Vitesse de croisière en km/h	170	170
Distance maximale franchissable en km	500	500



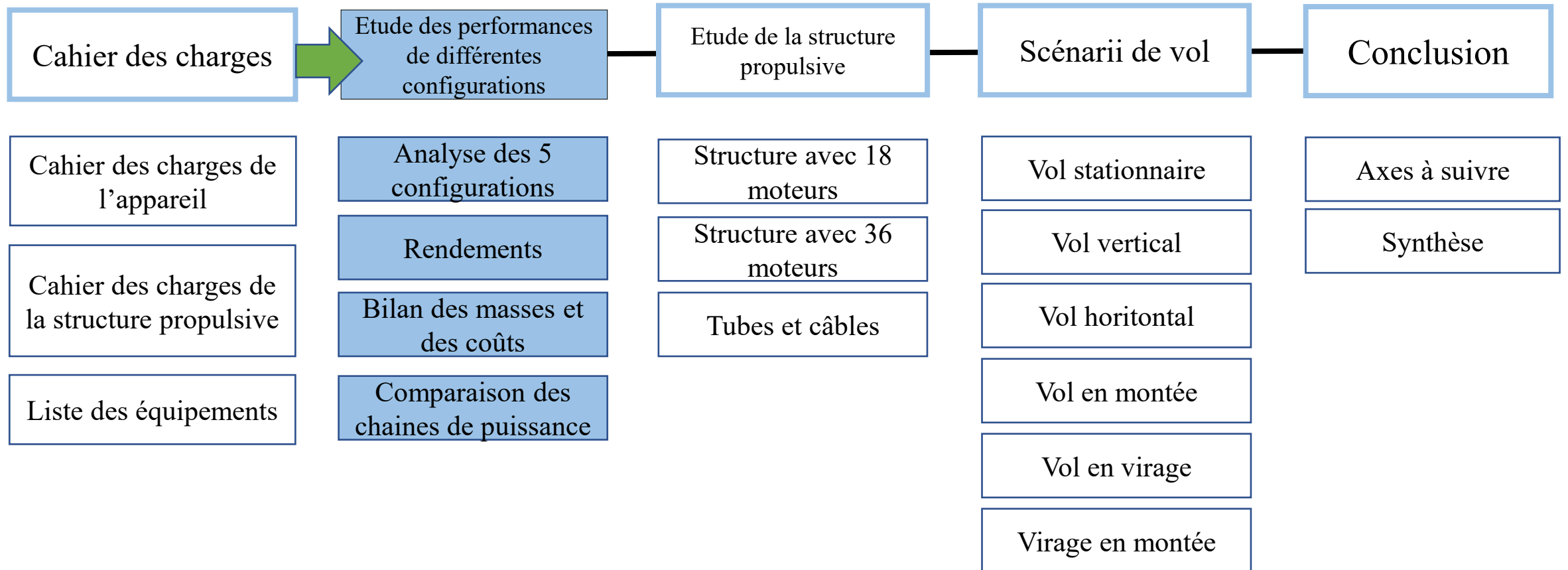
36 Hélices



18 Hélices

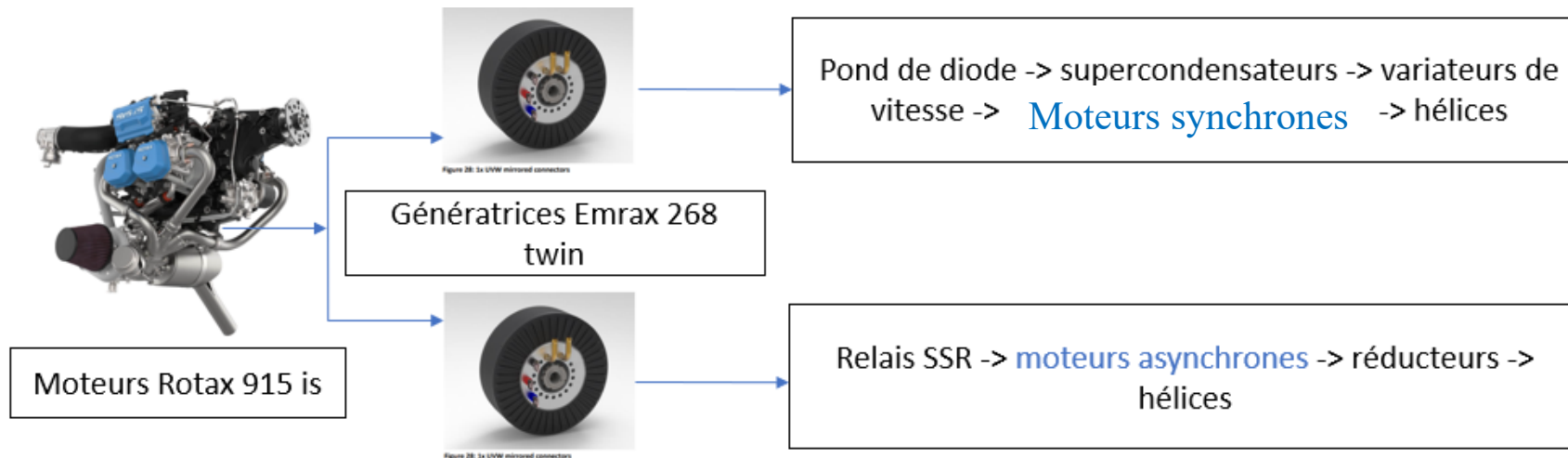
Surface de voilure identique

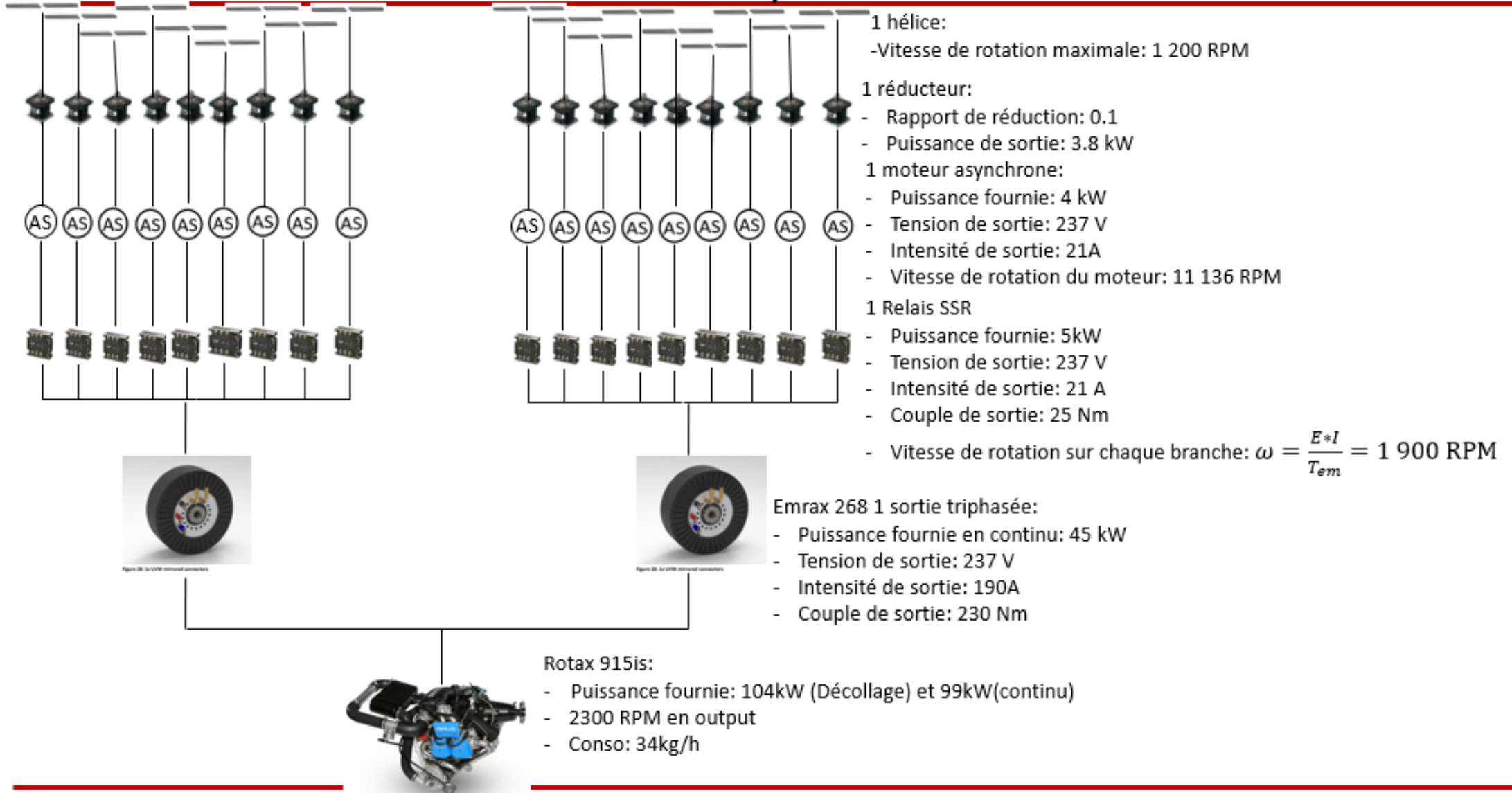
Nom de la configuration		Moteur	2 génératrices	Redresseur	Stockage	Relais SSR ou variateurs de vitesse	Moteurs asynchrones ou synchrones	Réducteurs et hélices
Configuration 1	E268 Tri1 H18 asynchrone	Rotax 915 is 99kW (en continu)	2 Emrax 268 avec 1 sortie triphasée	/	/	18 relais SSR	18 moteurs asynchrones	18 réducteurs + 18 hélices
Configuration 2	E268 Tri2 H18 asynchrone	Rotax 915 is 99kW	2 Emrax 268 avec 2 sorties triphasées	/	/	18 relais SSR	18 moteurs asynchrones	18 réducteurs + 18 hélices
Configuration 3	E268 Tri2 H18 synchrone	Rotax 915 is 99kW	2 Emrax 268 avec 2 sorties triphasées	4 ponts de diodes triphasés //	4 packs de supercondensateurs //	18 variateurs de vitesse	18 moteurs synchrones	18 réducteurs + 18 hélices
Configuration 4	E268 Hexa H18 synchrone	Rotax 915 is 99kW	2 Emrax 268 avec 1 sortie hexaphasée	2 ponts de diodes hexaphasés//	2 packs de supercondensateurs //	18 variateurs de vitesse	19 moteurs synchrones	18 réducteurs + 18 hélices
Configuration 5	E268 Hexa H36 synchrone	Rotax 915 is 99kW	2 Emrax 268 avec 1 sortie hexaphasée	2 ponts de diodes hexaphasés//	2 packs de supercondensateurs //	36 variateurs de vitesse	20 moteurs synchrones	36 hélices

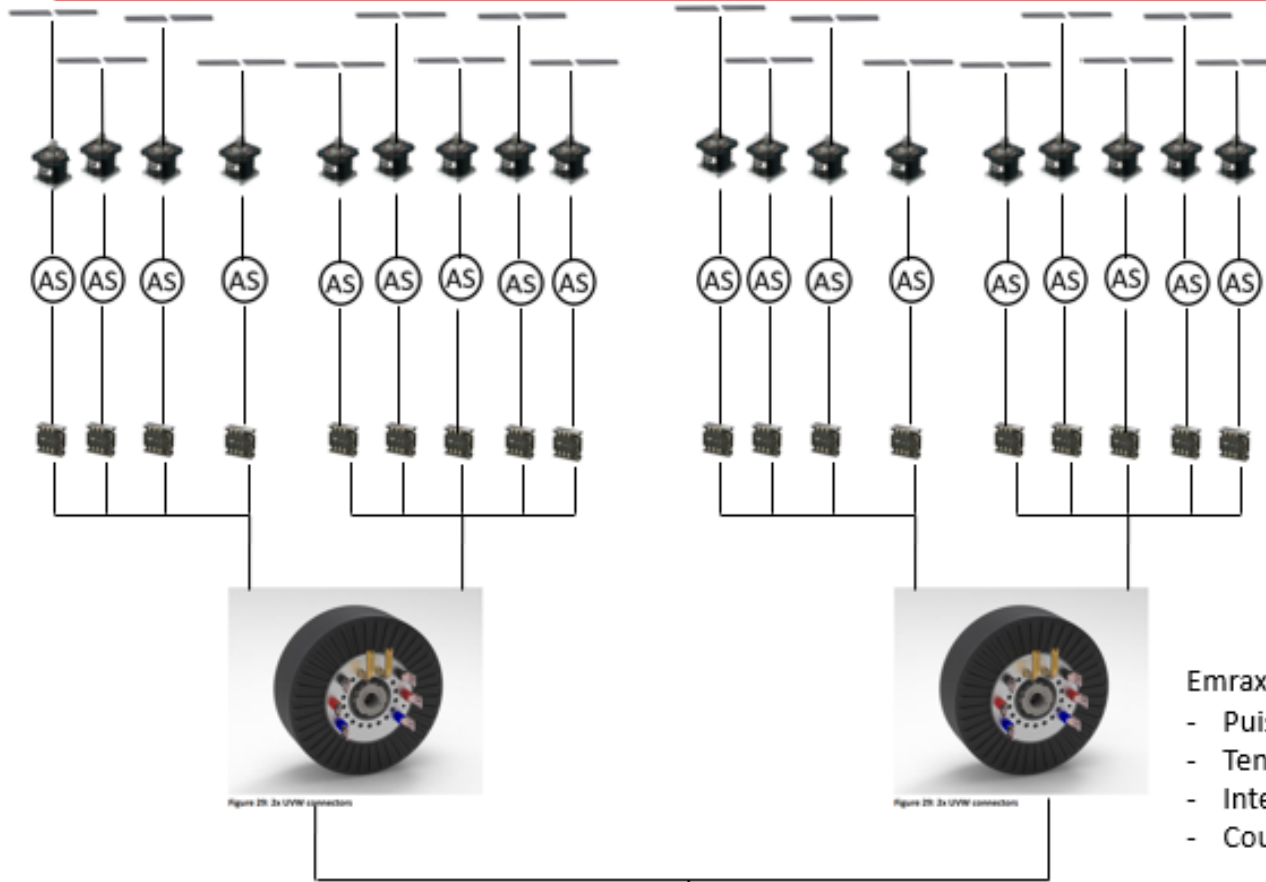


5 configurations de chaîne de puissance ont été étudiées :

- Configuration 1 : 2 Emrax 268 triphasés 1 sortie / 18 moteurs asynchrones
- Configuration 2 : 2 Emrax 268 triphasés 2 sorties (4 sorties triphasées) / 18 moteurs asynchrones
- Configuration 3 : 2 Emrax 268 triphasés 2 sorties / 18 moteurs synchrones
- Configuration 4 : 2 Emrax 268 hexaphasés / 18 moteurs synchrones
- Configuration 5 : 2 Emrax 268 hexaphasés / 36 moteurs synchrones







1 hélice:

- Vitesse de rotation maximale: 1200 RPM

1 réducteur:

- Rapport de réduction: 0.1
- Puissance de sortie: 3.8 kW

1 moteur asynchrone:

- Puissance fournie: 4kW
- Tension de sortie: 237 V
- Intensité de sortie: 21A
- Vitesse de rotation du moteur: 11 136RPM

1 Relais SSR

- Puissance fournie: 5 kW (branche 4 relais) et 4kW (branche avec 5 relais)
- Tension de sortie: 237 V
- Intensité de sortie: 23A (branche avec 4 relais) et 19A (branche avec 5 relais)
- Couple de sortie: 29 Nm (branche avec 4 relais) et 23 Nm (branche avec 5 relais)

Emrax 268 2 sorties triphasées :

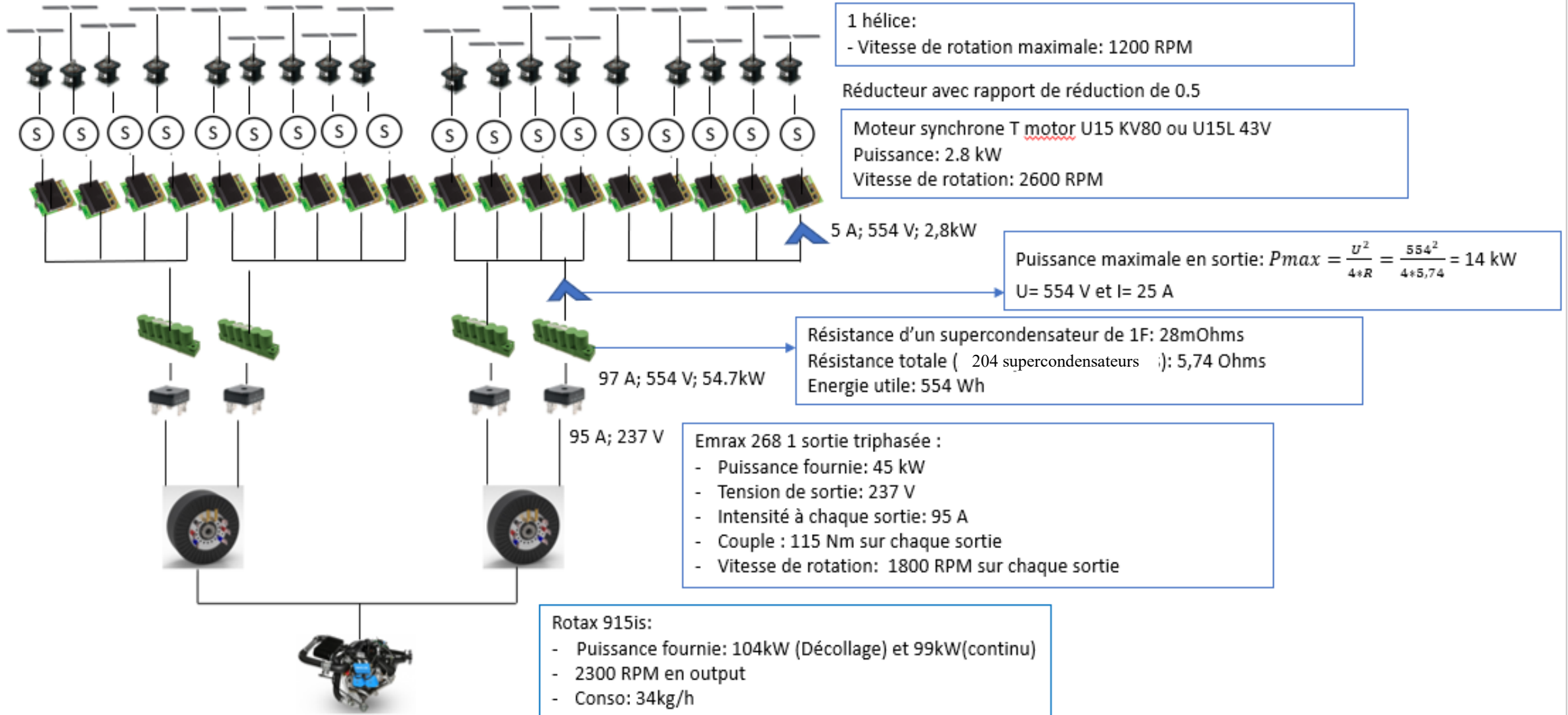
- Puissance fournie: 45kW
- Tension de sortie: 237 V
- Intensité à chaque sortie = $190A / 2 = 95 A$
- Couple de sortie: 115 Nm sur chaque sortie

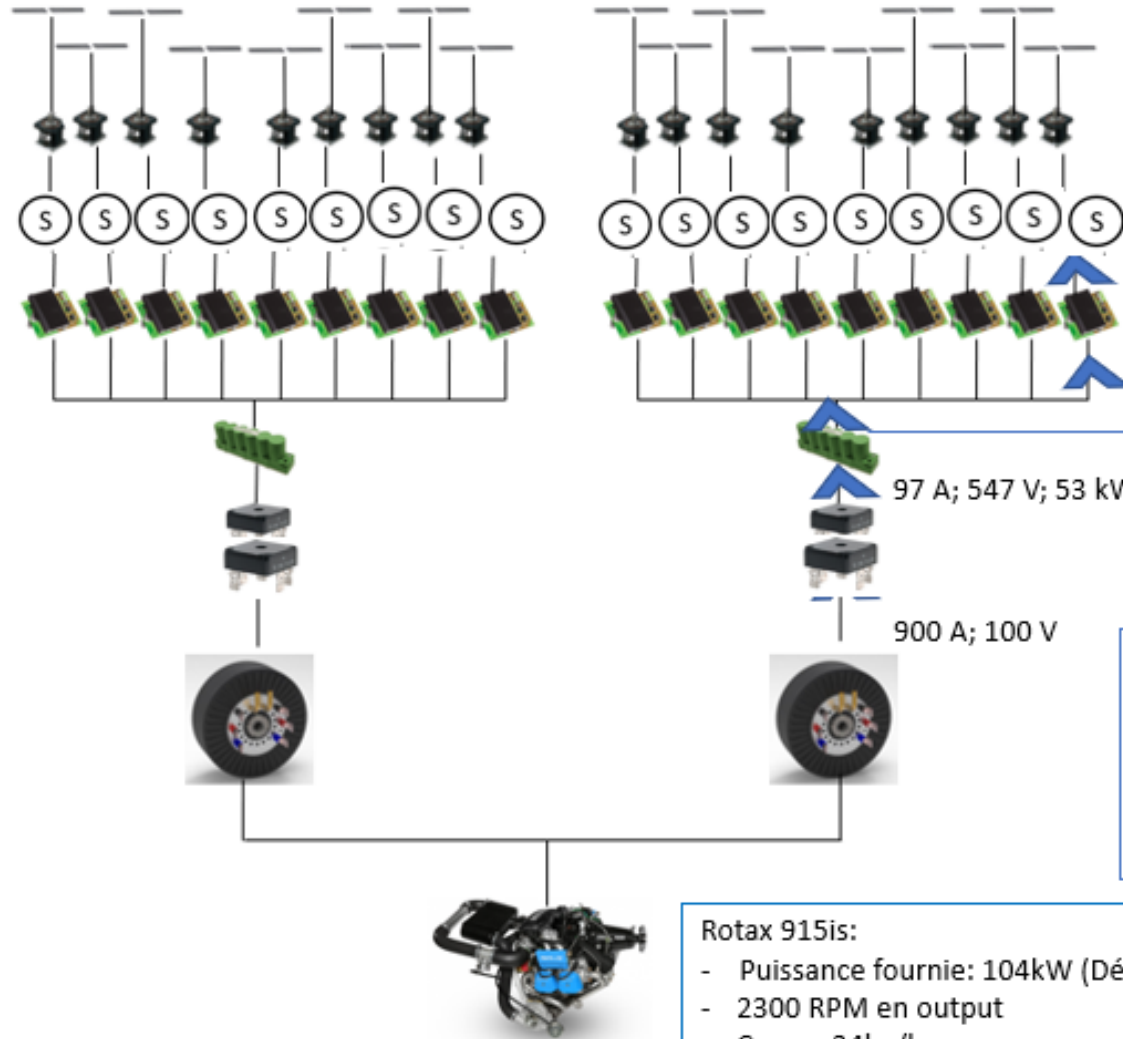
Rotax 915is:

- Puissance fournie: 104kW (Décollage) et 99kW(continu)
- 2300 RPM en output
- Conso: 34kg/h



Configuration 3: E268 Tri2 H18 synchrone





1 hélice:

- Vitesse de rotation maximale: 1200 RPM

Réducteur, rapport de réduction: 0.5

Moteur à courant continu de 1.4 W

Vitesse de rotation sur chaque branche: 1459 RPM (43KV) ou 2000 RPM (80KV)

2.7 A; 547 V; 1.4 kW

Puissance maximale en sortie: $P_{max} = \frac{U^2}{4+R} = \frac{547^2}{4+5.7} = 13 \text{ kW}$
 $U = 547 \text{ V}$ et $I = 24 \text{ A}$

97 A; 547 V; 53 kW

Résistance d'un supercondensateur de 1F: 28mOhms

Résistance totale (202 supercondensateurs): 5.7 Ohms

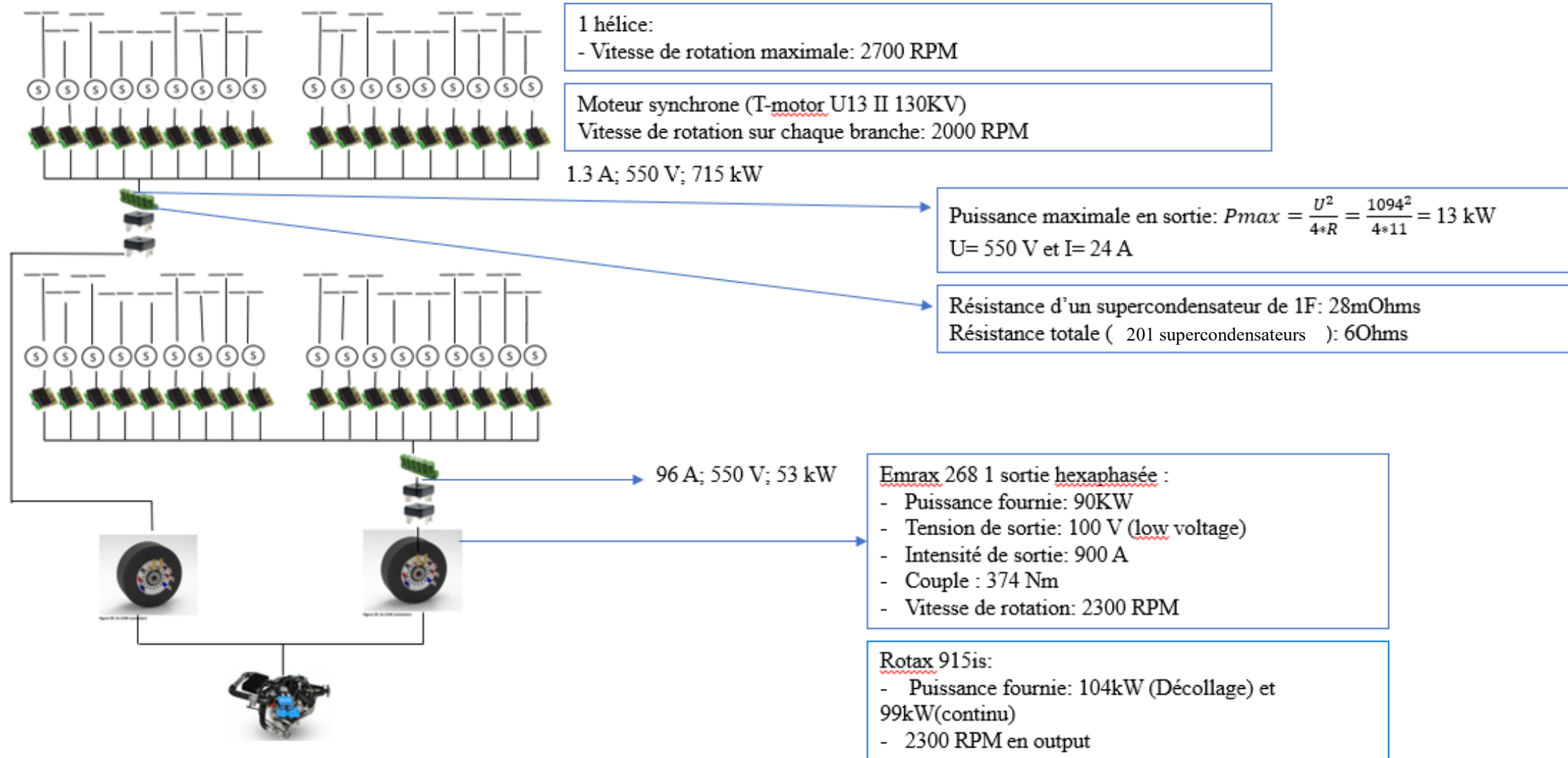
900 A; 100 V

Emrax 268 1 sortie hexaphasée :

- Puissance fournie: 90kW
- Tension de sortie: 100 V (low voltage)
- Intensité de sortie: 900 A
- Couple : 373 Nm
- Vitesse de rotation: 2300 RPM

Rotax 915is:

- Puissance fournie: 104kW (Décollage) et 99kW(continu)
- 2300 RPM en output
- Conso: 34kg/h



Choix du moteur

Configuration 5: E268 Hexa H36 synchrone

Moteur U13 II 130KV

- 380 euros
- Puissance fournie: 715 kW
- Vitesse de rotation: 2000 RPM
- Poussée fournie: 5765 N



Nom de la configuration		Moteur	Puissance (W)	Vitesse de rotation (RPM)	2 génératrices	Puissance (W)	Tension (V)	Redresseur	Stockage	Relais SSR ou variateurs de vitesse	Moteurs asynchrones ou synchrones	Puissance (W)	Réducteurs et hélices	Vitesse de rotation d'une hélice (RPM)
Configuration 1	E268 Tri1 H18 asynchrone	Rotax 915 is	99 000	2300	2 Emrax 268 avec 1 sortie triphasée	90 000	237	/	/	18 relais SSR	18 moteurs asynchrones	4 000	18 réducteurs + 18 hélices	1 200
Configuration 2	E268 Tri2 H18 asynchrone				2 Emrax 268 avec 2 sorties triphasées			/	/	18 relais SSR	18 moteurs asynchrones	4 000	18 réducteurs + 18 hélices	1 200
Configuration 3	E268 Tri2 H18 synchrone				4 ponts de diodes triphasés parallèles			4 packs de supercondensateurs (204 au total) parallèles	18 variateurs de vitesse	18 moteurs synchrones	2 800	18 réducteurs + 18 hélices	1 200	
Configuration 4	E268 Hexa H18 synchrone				2 ponts de diodes hexaphasés parallèles			2 packs de supercondensateurs (202 au total) parallèles	18 variateurs de vitesse	18 moteurs synchrones	1 400	18 réducteurs + 18 hélices	1 200	
Configuration 5	E268 Hexa H36 synchrone				2 Emrax 268 avec 1 sortie hexaphasée	90 000	100	2 ponts de diodes hexaphasés parallèles	3 packs de supercondensateurs (201 au total) parallèles	36 variateurs de vitesse	36 moteurs synchrones	715	36 hélices	2700

Configuration avec moteur asynchrone		Emrax 268	Relais SSR	Moteurs asynchrones	Réducteur			Total
Configuration 1	E268 Tri1 H18 asynchrone	0,92	0,9	0,76	0,94			0,6
Configuration 2	E268 Tri2 H18 asynchrone	0,92	0,9	0,76	0,94			0,6
Configuration avec moteur synchrone		Emrax 268	Pond de diode	Supercondensateur	Variateurs de vitesse	Moteur synchrones	Réducteur	Total
Configuration 3	E268 Tri2 H18 synchrone	0,92	0,5	1	0,99	0,9	0,94	0,4
Configuration 4	E268 Hexa H18 synchrone	0,92	0,95	1	0,99	0,9	0,94	0,7
Configuration 5	E268 Hexa H36 synchrone	0,92	0,95	1	0,99	0,9		0,8

La **configuration 5** a le meilleur rendement



Configuration		Masse en kg	Prix en euros	Rendements
Configuration 1	2 Emrax 268 triphasés 1 sortie / 18 moteurs asynchrones	405	50 400	0.6
Configuration 2	2 Emrax 268 triphasés 2 sorties (4 sorties triphasées) / 18 moteurs asynchrones	405	50 400	0.6
Configuration 3	2 Emrax 268 triphasés 2 sorties / 18 moteurs synchrones	522	61 700	0.4
Configuration 4	2 Emrax 268 hexaphasés / 18 moteurs synchrones	395	61 200	0.7
Configuration 5	2 Emrax 268 hexaphasés / 36 moteurs synchrones	396	143 000	0.8

En **vert** la valeur la plus élevée et en **rouge** la valeur la plus faible

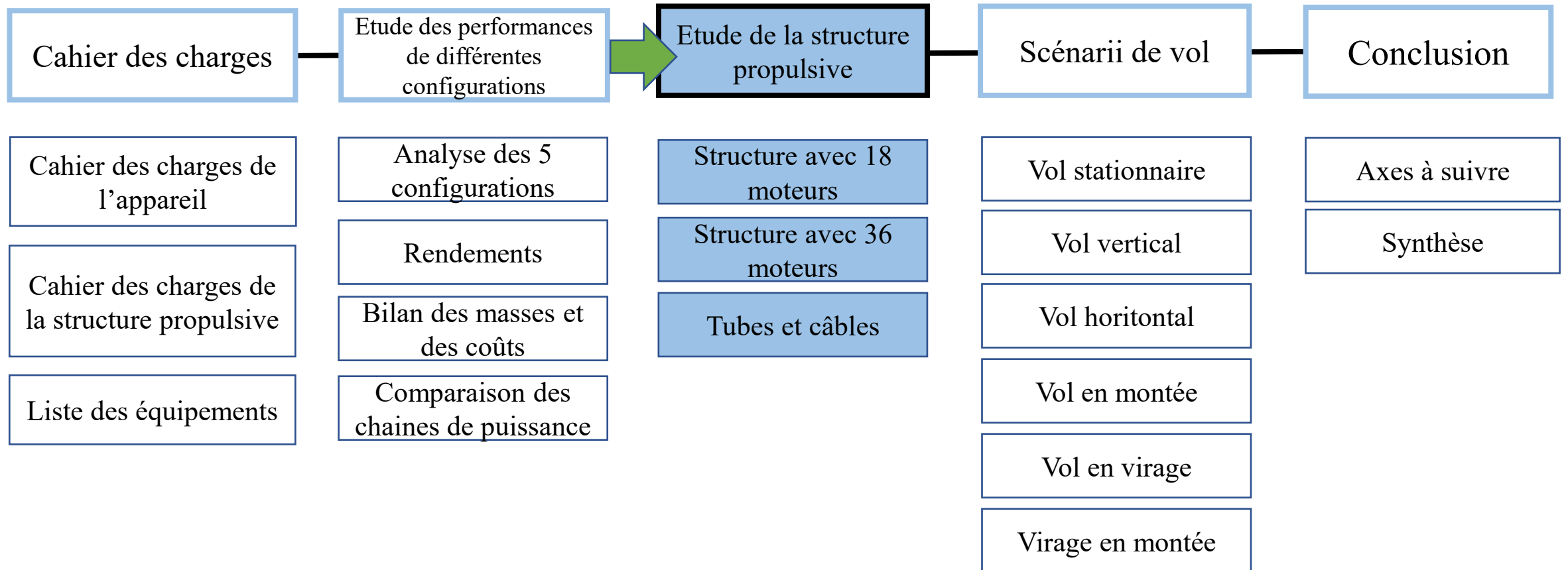
Configuration		Stockage (3) ou pas de stockage (1)	Relais SSR (1) Variateur de vitesse (3)	Moteurs asynchrones (1) ou synchrones (3)	Rendements	Masse totale de la chaîne de puissance	Prix	Total
Configuration 1	2 Emrax triphasé 1 sortie / 18 moteurs asynchrones	1	1	1	1	2	3	9
Configuration 2	2 Emrax triphasé 2 sorties = 4 sorties triphasées / 18 moteurs asynchrones	1	1	1	1	2	3	9
Configuration 3	Emrax triphasé 2 sorties / 18 moteur synchrones	3	3	3	1	1	2	13
Configuration 4	Emrax hexaphasé / 18 moteurs synchrones	3	3	3	2	2	2	15
Configuration 5	Emrax hexaphasé / 36 moteurs synchrones	3	3	3	3	3	1	16

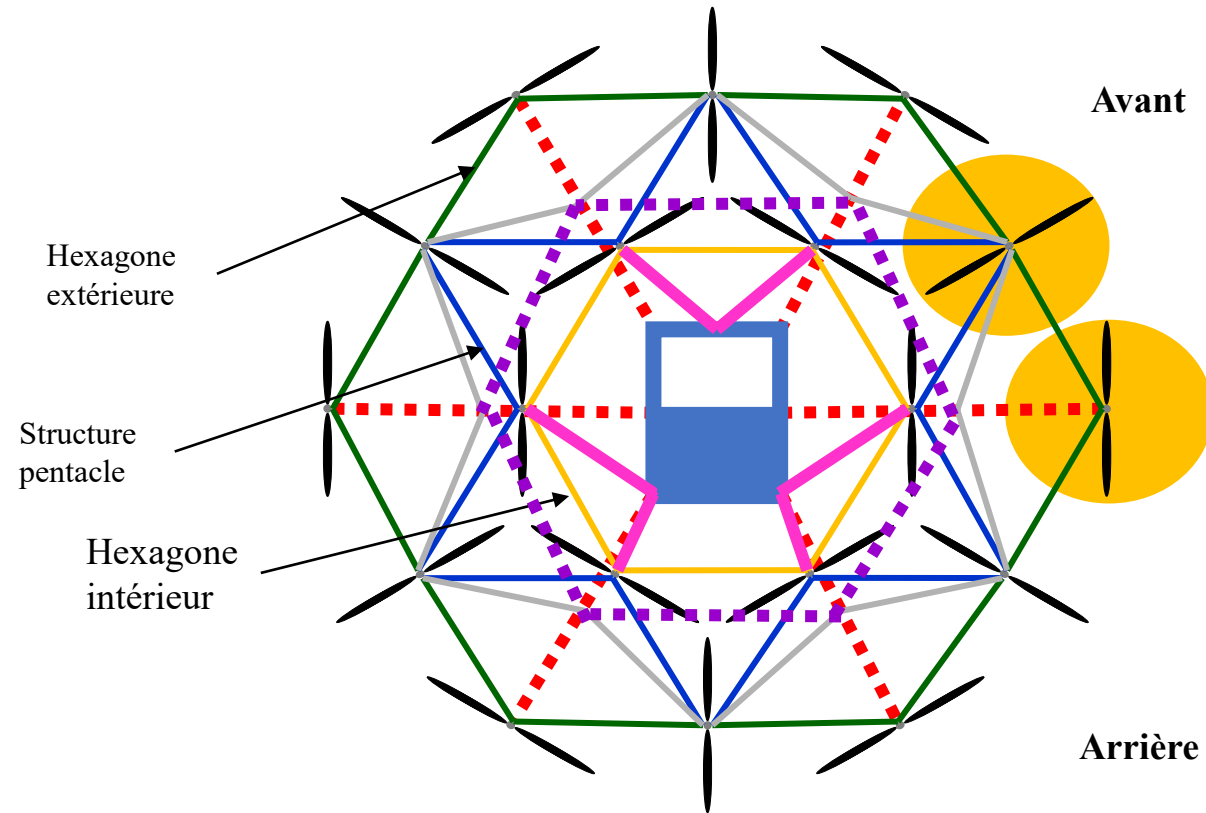
Légende:

- 1: mauvais
- 2: moyen
- 3: bon

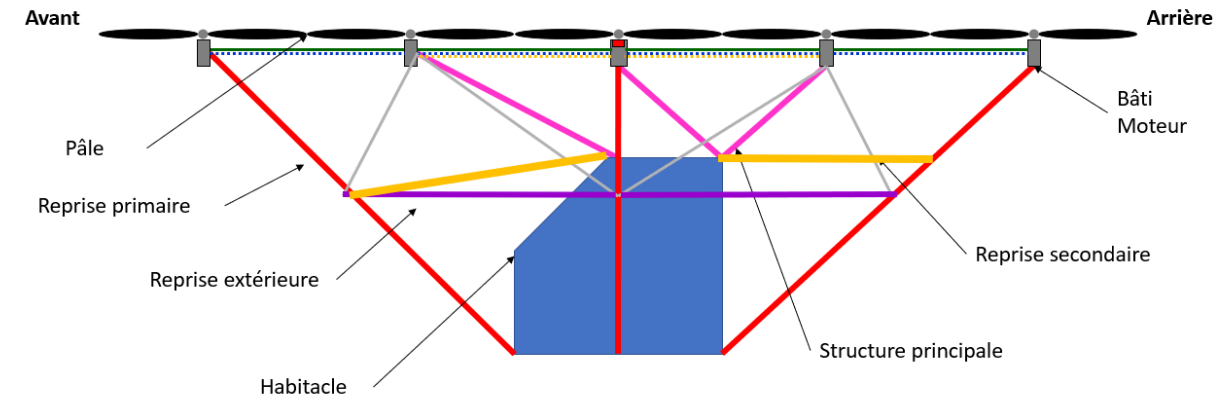
La **configuration 5** est la meilleure configuration



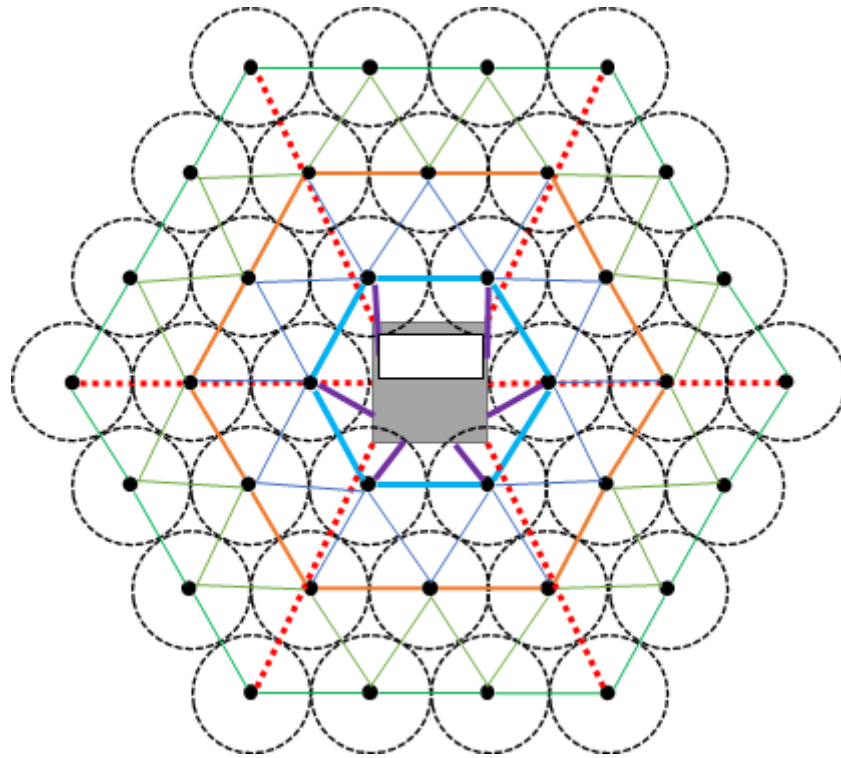




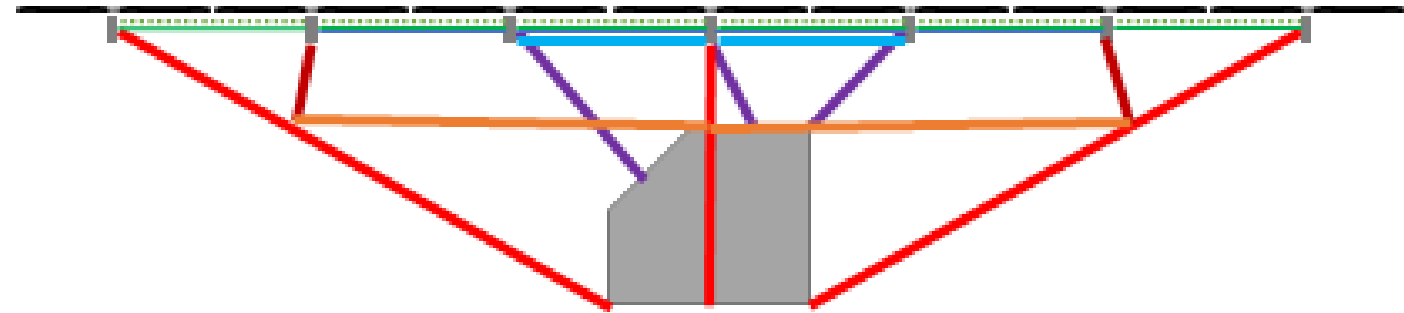
Vue de dessus



Vue de côté



Vue de dessus



Vue de côté

Hélice carbone P57x22 (paire) - TMOTOR

- 2399 euros
- Vitesse de rotation: 2000 RPM
- Poussée fournie: 5765 N





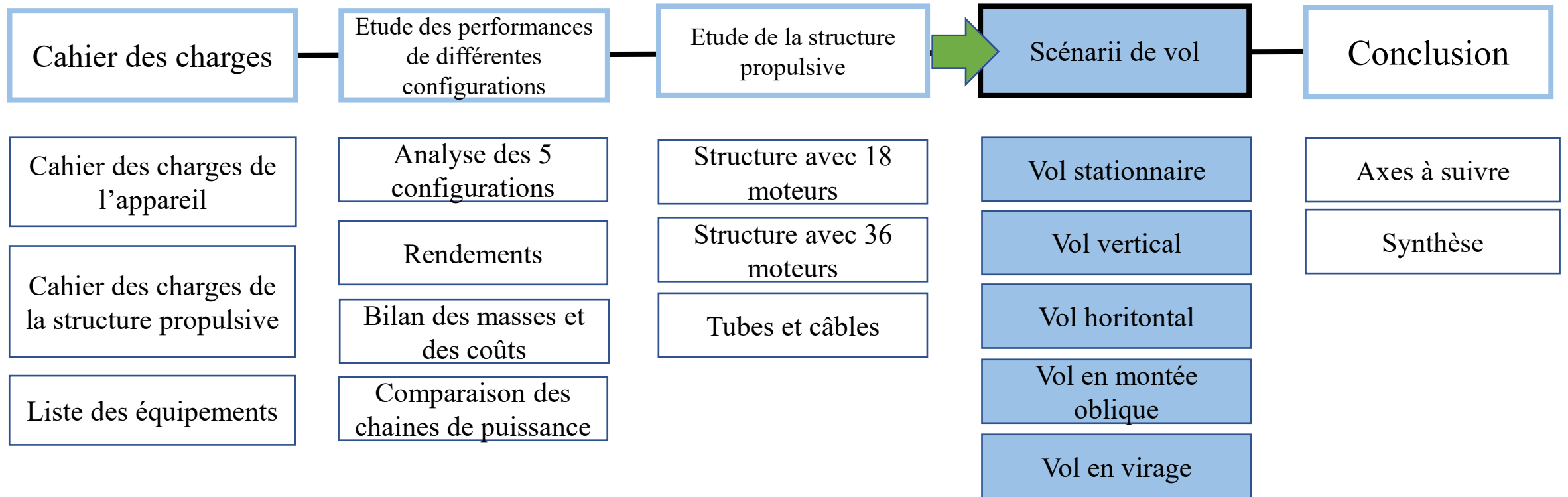
- ⇒ Module de Young minimal à respecter
- ⇒ Coefficient de résistances aux efforts de cisaillements minimal à respecter
- ⇒ Masse maximale de la structure totale à prendre en compte

Tubes en composite

Creux pour le passage des câbles + allègement

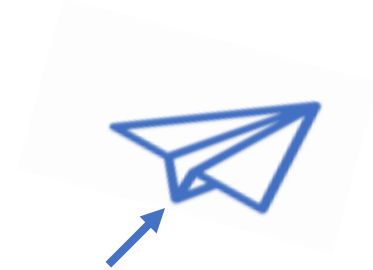
	Cuivre	Aluminium
Chute de tension relative (V)	4	4
Section de câble (en mm^2)	2.3	3.7
Masse par surface (kg/m^2)	35	95
Prix au kg	1.2 euros/1 kg	0.1 euros /1 kg

=> Câbles électriques en aluminium à privilégier





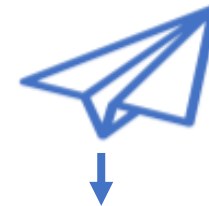
Hovering



Oblique Flight



Vertical Upward Flight



Vertical downward Flight



Horizontal Flight



Turn Flights



Formulas :

- Induced Speed $v_i = \sqrt{\frac{F}{2\rho S}}$
- Thrust $F = 2\rho S v_i^2$
- Power $P = F v_i^2 = \sqrt{\frac{F^3}{2\rho S}}$

		Z_min = 0 feet			Z_max = 14 000 feet		
		H18	H36 (62)	H36 (57)	H18	H36 (62)	H36 (57)
Hovering	Induced speed	6,62	6,56	7,12	8,21	8,13	8,83
	Horizontal speed	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Vertical velocity	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Thrust	7354,99	7354,99	7354,99	7354,99	7354,99	7354,99
	Theoretical Power	48,72	48,23	52,35	60,41	59,81	64,91
	Rotax power	60,90	60,28	65,43	75,52	74,76	81,14

Conclusion :

- Power value in accordance with the expected values
- Lower area for the 57-inch rotor



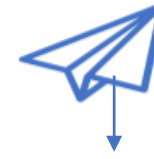
Formulas :

- Initial Induced Speed $v_{i0} = \sqrt{\frac{F}{2\rho S}}$
- Induced Speed $v_i = \frac{v_{i0}}{\frac{v_v}{v_{i0}} + \sqrt{1 + (\frac{v_v}{2v_{i0}})^2}}$
- Thrust $F = 2\rho S(v_i + v_v)v_i$
- Power $P = F(v_i + v_v) = Fv_i + Fv_v$

		Z_min = 0 feet			Z_max = 14 000 feet		
		H18	H36 (62)	H36 (57)	H18	H36 (62)	H36 (57)
Vertical Upward flight	Induced speed	5,04	4,98	5,51	6,57	6,49	7,16
	Horizontal speed	4,00	4,00	0,00	4,00	4,00	0,00
	Vertical velocity	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Thrust	7646,58	7651,05	7616,42	7564,01	7567,38	7541,32
	Theoretical Power	69,15	68,71	72,46	79,92	79,36	84,14
	Rotax power	86,44	85,89	90,57	99,91	99,20	105,18

Conclusion :

- Power values in accordance with the expected values
- Within limits defined by Rotax



Formulas :

- Initial Induced Speed $v_{i0} = \sqrt{\frac{F}{2\rho S}}$
- Induced Speed $v_i = \frac{v_{i0}}{\frac{v_v}{v_{i0}} + \sqrt{1 + (\frac{v_v}{2v_{i0}})^2}}$
- Thrust $F = 2\rho S(v_i + v_v)v_i$
- Power $P = F(v_i + v_v) = Fv_i + Fv_v$

		Z_min = 0 feet			Z_max = 14 000 feet		
		H18	H36 (62)	H36 (57)	H18	H36 (62)	H36 (57)
Vertical Downward Flight	Induced speed	9,65	10,97	10,89	9,60	10,89	10,89
	Horizontal speed	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00
	Vertical velocity	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Thrust	9133,03	9186,89	8799,00	8326,43	8353,24	8157,65
	Theoretical Power	51,58	51,41	53,12	58,00	57,58	61,24
	Rotax power	64,47	64,27	66,40	72,50	71,98	76,55

Conclusion :

- Power values in accordance with the expected values
- Downward Flight's Control



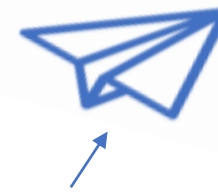
Formulas :

- Initial Induced Speed $v_{i0} = \sqrt{\frac{F}{2\rho S}}$
- Induced Speed $v_i = \frac{v_{i0}}{\frac{v_h}{v_{i0}} + \sqrt{1 + (\frac{v_h}{2v_{i0}})^2}}$
- Thrust $F = 2\rho S \sqrt{v_i^2 + v_h^2} v_i$
- Power $P = Fv = F\sqrt{v_i^2 + v_h^2}$

		Z_min = 0 feet			Z_max = 14 000 feet		
		H18	H36 (62)	H36 (57)	H18	H36 (62)	H36 (57)
Horizontal Flight	Induced speed	4,03	3,98	4,46	5,42	5,35	5,97
	Horizontal speed	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22	47,22
	Vertical velocity	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Thrust	6179,55	6199,75	6043,41	5814,01	5828,25	5721,50
	Theoretical Power	56,47	56,50	56,41	57,16	57,07	58,04
	Rotax power	70,59	70,63	70,51	71,45	71,33	72,55

Conclusion :

- Power value in accordance with the expected values
- H36 and H18 equivalent
- Large margin available for cornering



Formulas :

- Initial Induced Speed $v_{i0} = \sqrt{\frac{F}{2\rho S}}$
- Induced Speed $v_i = \frac{v_{i0}}{\frac{\sqrt{v_v^2 + v_h^2}}{v_{i0}} + \sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{v_v^2 + v_h^2}}{2v_{i0}}\right)}}$
- Thrust $F = 2\rho S \sqrt{(v_i + v_v)^2 + v_h^2} v_i$
- Power $P = Fv = F \sqrt{(v_i + v_v)^2 + v_h^2}$

		Z_min = 0 feets			Z_max = 14 000 feets		
		H18	H36 (62)	H36 (57)	H18	H36 (62)	H36 (57)
Oblique Upward Flight	Induced speed	3,98	3,80	4,83	5,68	5,63	6,88
	Horizontal speed	38,23	38,23	38,23	38,23	38,23	38,23
	Vertical velocity	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Thrust	8898,98	8900,06	8076,42	7903,68	7908,92	7882,32
	Theoretical Power	90,36	90,50	92,69	86,09	85,89	88,89
	Rotax power	96,70	96,38	94,51	105,23	104,75	104,87

Conclusion :

- Power value in accordance with the expected values
- H36 and H18 equivalent
- Oblique flight at Z max considered exceptional and can therefore be accepted because below 105 kW



62 inches Model

Scenario	Inclination in degree °	Load Factor	Theoretical power for this move (kW)	Rotax power used to move (kW)
No Turn	0	0,79	0	0,00
Low Turn	5	0,80	0,22	0,27
	10	0,80	0,88	1,10
	15	0,82	2,01	2,52
Medium Turn	20	0,84	3,66	4,58
	25	0,87	5,90	7,37
	30	0,91	8,83	11,04
	35	0,97	12,60	15,75
Tight Turn	40	1,03	17,43	21,79
	45	1,12	23,64	29,55
	50	1,23	31,71	39,64

57 inches Model

Scenario	Inclination in degree °	Load Factor	Theoretical power for this move (kW)	Rotax power used for this move (kW)
No Turn	0	0,78	0	0,00
Low Turn	5	0,78	0,21	0,27
	10	0,79	0,86	1,08
	15	0,81	1,98	2,47
Medium Turn	20	0,83	3,60	4,49
	25	0,86	5,79	7,24
	30	0,90	8,67	10,83
	35	0,95	12,37	15,46
Tight Turn	40	1,02	17,11	21,39
	45	1,10	23,20	29,01
	50	1,21	31,13	38,92

- Turning up to 45° possible at 100% of max speed
- Others Tight turn possible conditionally



62 inches Model

Scenario	Inclination in degree °	Load Factor	Theoretical power for this move (kW)	Rotax power used to move (kW)
No Turn	0	1,05	0	0,00
Low Turn	5	1,05	0,32	0,40
	10	1,06	1,29	1,62
	15	1,08	2,96	3,70
Medium Turn	20	1,12	5,38	6,72
	25	1,16	8,66	10,83
	30	1,21	12,96	16,21
	35	1,28	18,50	23,13
Tight Turn	40	1,37	25,59	31,99
	45	1,48	34,71	43,39
	50	1,63	46,57	58,21

57 inches Model

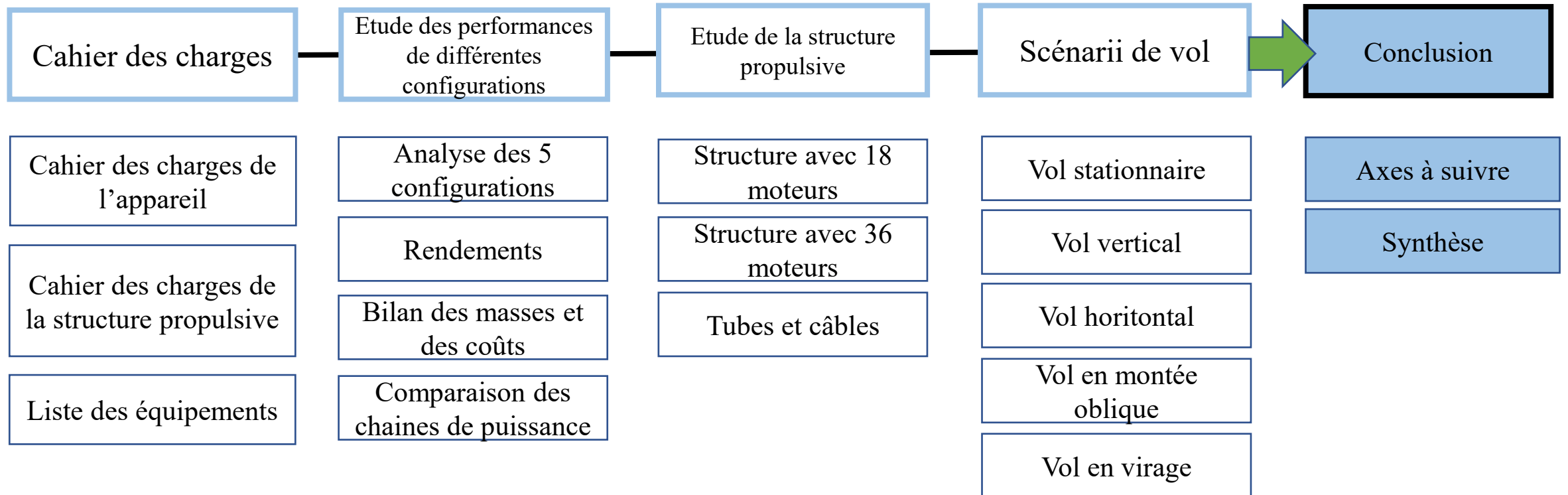
Scenario	Inclination in degree °	Load Factor	Theoretical power for this move (kW)	Rotax power used for this move (kW)
No Turn	0	1,03	0	0,00
Low Turn	5	1,04	0,32	0,39
	10	1,05	1,27	1,59
	15	1,07	2,91	3,64
Medium Turn	20	1,10	5,29	6,62
	25	1,14	8,53	10,66
	30	1,19	12,76	15,95
	35	1,26	18,21	22,77
Tight Turn	40	1,35	25,19	31,49
	45	1,46	34,17	42,71
	50	1,60	45,84	57,31

- 5° Low turn possible
- Potential Low, Medium and Tight turn conditionally

All values are expressed in kW for 57 inches Rotor's Model

Flight's Type	Theoretical Power requested	Rotax's Power	Average Power Margin	Extreme Power Margin
Hovering	64,91	81,14	17,86	23,86
Upward Flight	84,14	105,18	-6,18	-0,18
Downward Flight	61,24	76,55	22,45	28,45
Horizontal Flight	58,04	72,55	26,45	32,45
Oblique Flight	83,89	104,87	-5,87	0,13

- Rotax consistent with the engine needs of the device





Réaliser la **mécanique de vol** et de **stabilisation** du Mini-Bee en configuration 36 rotors

Réaliser la **structure propulsive avec 36 moteurs**

Etude des performances de
la chaîne de propulsion,
structure, mécanique



Choix fait sur la
configuration Emrax 268
hexaphasé, 36 moteurs
synchrones



Synthèse envoyée aux
autres écoles

