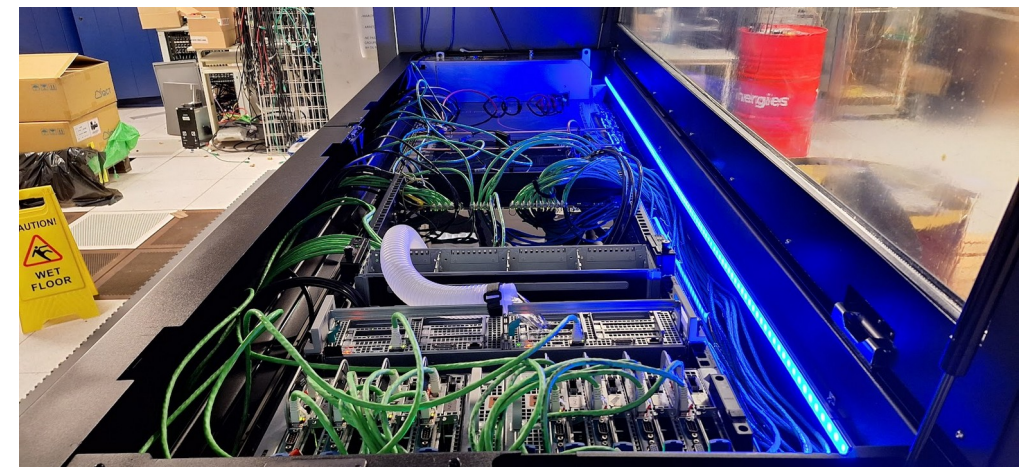


Journée Immersion Cooling Avec Itrium

L'immersion à l'ENS-Lyon
Quatre années d'expérience en Immersion
De “Voldemort” à 800 coeurs qui barbotent...

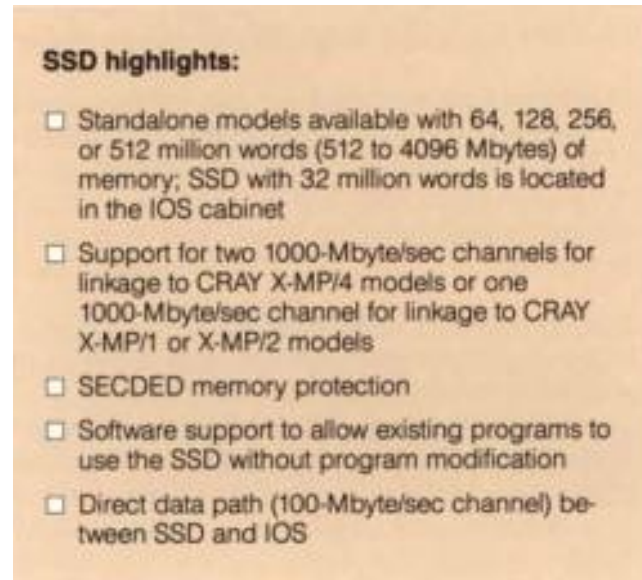
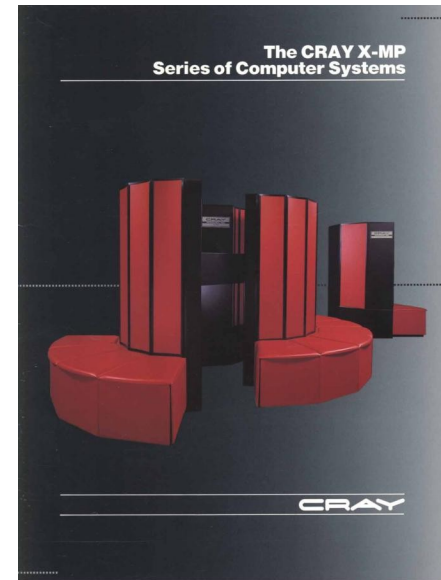


Emmanuel Quémener



Remplacement dans un contexte historique

- Il y a 40 ans au cinéma : « The Last Starfighter »
 - 27 minutes de « CGI », un Cray X-MP pour le calcul



The dense concentration of components requires special cooling techniques to overcome the accompanying problems of heat dissipation. A proven, patented cooling system using liquid refrigerant maintains the necessary internal system temperature, contributing to high system reliability and minimizing the need for expensive room cooling equipment.

- Le liquide : « Fluorinert »

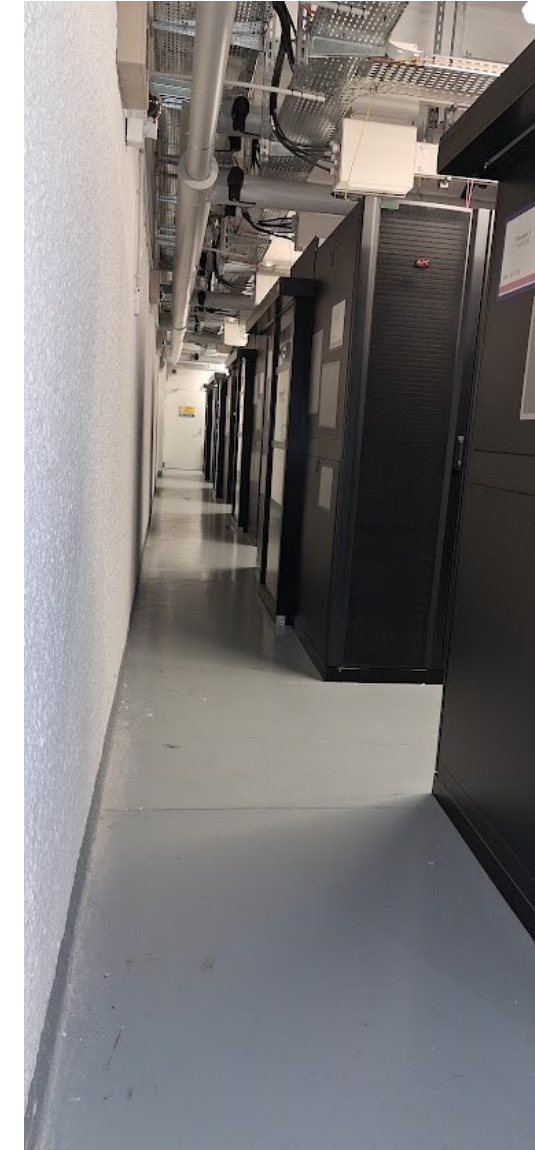
Ces fluides sont dangereux lorsqu'ils sont inhalés ou lorsqu'ils entrent en contact avec la peau ou les yeux. Rejetés dans l'atmosphère, ils deviennent de puissants gaz à effet de serre à durée de vie très longue : fin 2013, la perfluorotributylamine $N(C_4F_9)_3$ (FC-43) était ainsi le plus puissant gaz à effet de serre connu, demeurant actif dans l'atmosphère pendant au moins 500 ans¹.

- Pourquoi, 40 ans après, tous les ordinateurs ne sont pas « trempés » ?

Remplacement dans le contexte actuel

Le Data Center : royaume de la standardisation

- Des baies identiques : AT&T « 19 pouces »
 - 42U ou 50U de haut, 100 ans d'existence
- Des machines « rackables » :
 - 1U (1.75 pouces), 2U, 4U, 5U, 8U
- Un fluide caloporteur « simple » : l'air
 - Efficacité contestable (et variable!) : $1.256 \text{ kJ/m}^3/\text{K}$
- Des approches évolutives :
 - Jusqu'à ~2010 : plancher soufflant face aux baies
 - Depuis ~2010 : confinement allées chaude & froide
- A l'ENS de Lyon, nouveau DC ENS depuis fin 2017, PUE de 1.25

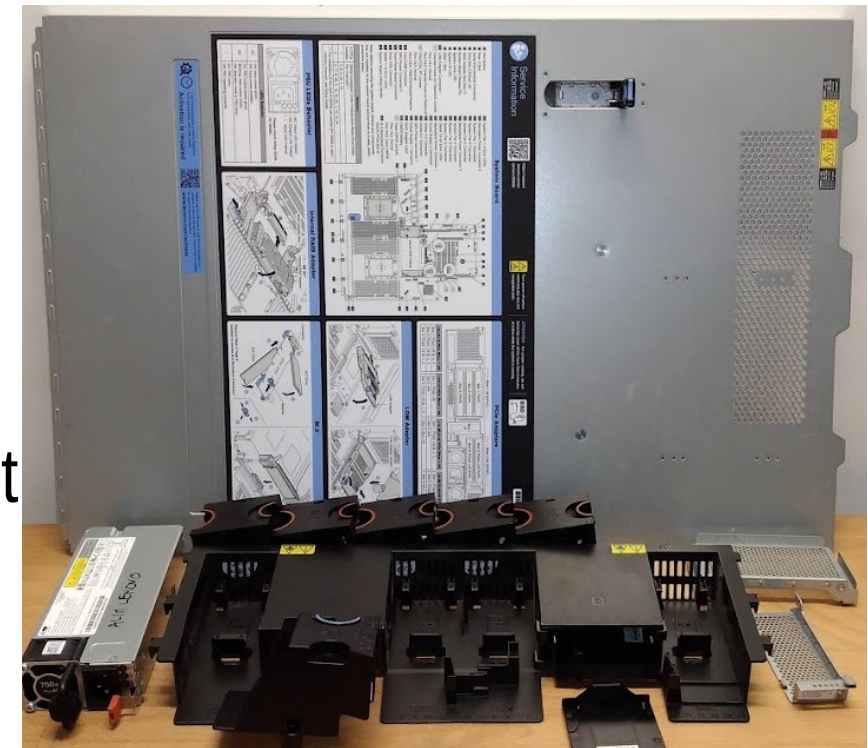


Pourquoi cette étude à l'ENS de Lyon ?

- Pour couvrir tous les aspects de cette « transition » air vers huile:
 - **Volet scientifique** : efficacité de l'immersion, recyclage de la chaleur, ..
 - **Volet technique** : processus d'adaptation, transformation des machines ou évolution des composants
 - **Volet opérationnel** : processus d'exploitation quotidien, entrée & sortie, sécurité associée
- Et pourquoi l'ENS de Lyon alors ?
 - Pour la partie scientifique : de 2021 à 2022, intégration de l'étude au LIP, équipe Avalon
 - Pour la partie HPC : tout est internalisé, offrant une flexibilité sur la manipulation des machines
 - Pour le CBP : ressources « RADIS » (Reproductibles, Adaptables, Diverses, Interactives, Simples)
- Pour les 3 volets, depuis octobre 2022, uniquement EQ...
 - 2022Q4-2023Q3 : étude huile Shell S5X dans bac Submer, test GPGPU Nvidia et CPU > 350W
 - 2023Q4-2024Q2 : étude huile TE Cooling Biolife 4, étude tous azimuts
 - 2024Q3-2025Q1 : anticipation déplacement expérimentation : arrêt, purge de l'huile, stand-by
 - 2025Q2-2025Q4 : reprise avec nouveau serveur Dell, bientôt Cisco (avec H200)

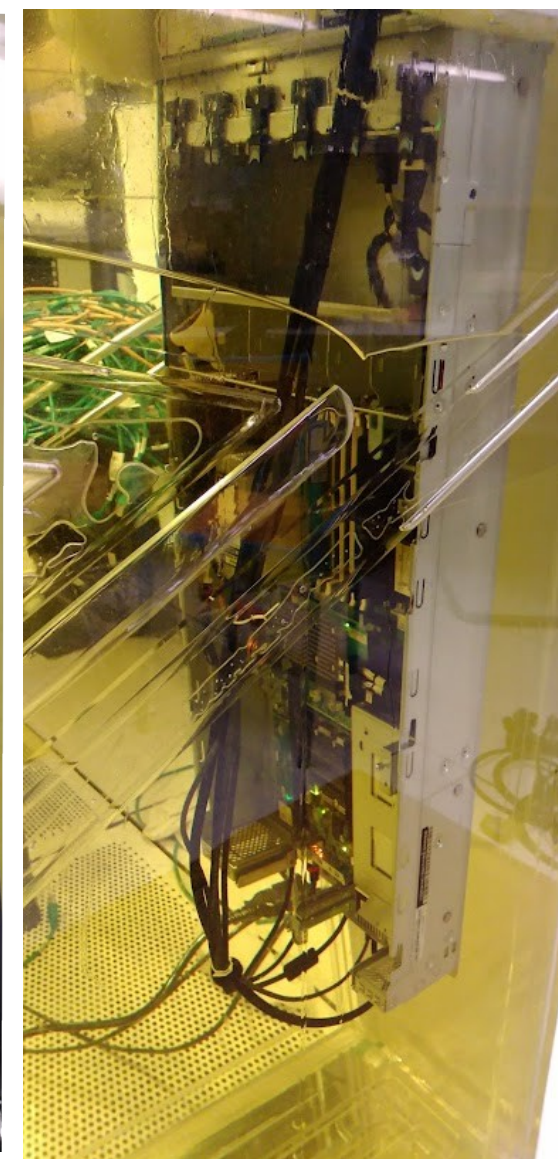
Préparation (initiale) pour l'immersion : l'an passé, supprimer « tout ce qui bouge »

- Dans l'air : évacuer les « calories » :
 - On multiplie la surface de contact : x200 pour un radiateur
 - On diffuse la chaleur par conduction ou convection (caloduc)
 - On chasse au ventilateur l'air chauffé :
 - Dans un serveur : ventilateur de 4 à 6 cm, rotation de 3000 à 20000 tours/min
 - Dans une station : 8 à 16 cm, rotation de 500 à 1000 tours/min
- Pour préparer les machines :
 - Supprimer la pâte thermique : processeur et radiateur en contact direct
 - Supprimer les ventilateurs (là en le conservant dans l'alimentation)
 - Supprimer les « guides » plastiques



Mars 2022 : serveur (neuf) en Immersion Sans ventilateur, ça démarre & ça tourne...

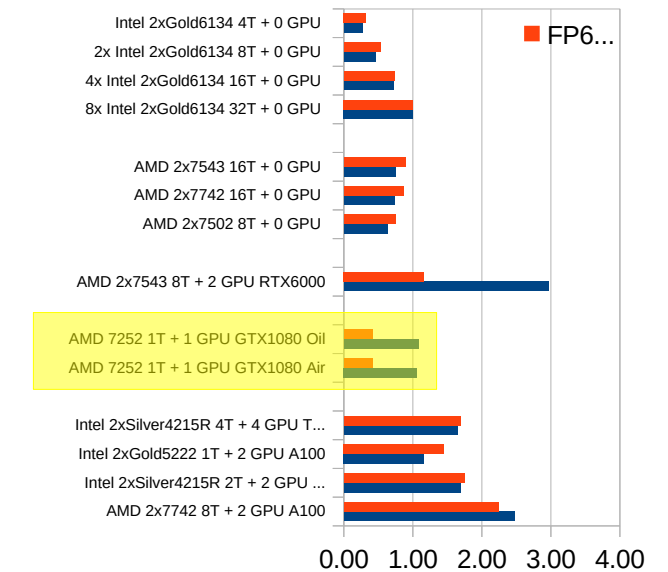
- Au repos : oil 74 W, air 68 W
 - Températures : oil 24°C, air 25°C
- En charge : oil 142 W, air 142 W
- Températures : oil 36°C, air 38.5 °C
 - Mais en IPMI et AC : 140 W pour les deux
 - Mais en IPMI et DC : oil 115 W, air 120 W
- Côté performance :
 - 1 % de différence...
- Mais : processeur « petit », mémoire « faible »



Mars 2022 : première étude de GPU immergée

Principal résultat : « décharge » plus rapide...

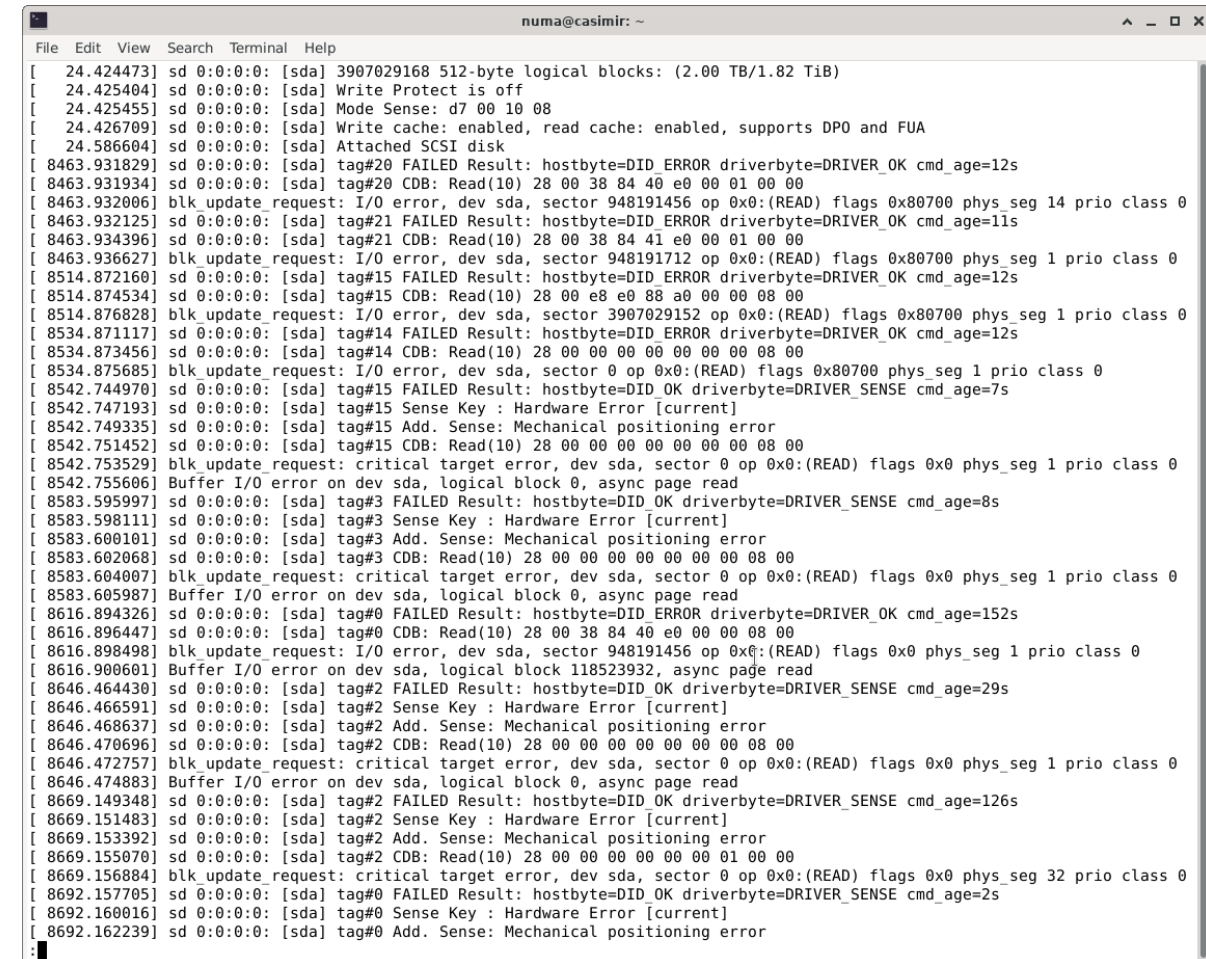
- Au repos, air (30°C et 10W), oil (30°C et 14 W) : le GPU/oil consomme plus
- Phase 1 : GPU sans radiateur dans Oil
 - Montée rapide en température (jusqu'à 90°C)
 - Plantage du GPU après 3 secondes (mise en sécurité)
- Phase 2 : GPU avec radiateur (sans pâte thermique)
 - Très bonne stabilité à la charge, 12°C de moins entre oil & air
 - Consommations & Températures : Oil/Air : 178W en soutenu, mais Oil/Air : 70°C/82°C
 - Fréquence : 1809 MHz en Oil mais 1759 MHz en Air
 - Performances : comparable en FP32 (516s/519s), 2 % plus rapide en FP64 (466s/474s)
 - Descente de température très lente dans l'air : 1m pour Oil, plus de 10m pour air



Mai 2023 : voyage d'un HDD en immersion

« La minute de vérité »

- Un HD de 2TB SAS « smart OK » installé
- Le R720 est démarré
- Après 40 secondes, HD de 2TB détecté
- Un badblocks invasif est lancé
 - Après 2h21'3" première erreur I/O
 - Après 2h22'22", seconde salve d'erreurs
 - « erreur de positionnement mécanique »...
- Expertise médico-légale en cours...



```
numa@casimir: ~  
File Edit View Search Terminal Help  
[ 24.424473] sd 0:0:0:0: [sda] 3907029168 512-byte logical blocks: (2.00 TB/1.82 TiB)  
[ 24.425404] sd 0:0:0:0: [sda] Write Protect is off  
[ 24.425455] sd 0:0:0:0: [sda] Mode Sense: d7 00 10 08  
[ 24.426709] sd 0:0:0:0: [sda] Write cache: enabled, read cache: enabled, supports DPO and FUA  
[ 24.586604] sd 0:0:0:0: [sda] Attached SCSI disk  
[ 8463.931829] sd 0:0:0:0: [sda] tag#20 FAILED Result: hostbyte=DID_ERROR driverbyte=DRIVER_OK cmd_age=12s  
[ 8463.931934] sd 0:0:0:0: [sda] tag#20 CDB: Read(10) 28 00 38 84 40 e0 00 01 00 00  
[ 8463.932006] blk_update_request: I/O error, dev sda, sector 948191456 op 0x0:(READ) flags 0x80700 phys_seg 14 prio class 0  
[ 8463.932125] sd 0:0:0:0: [sda] tag#21 FAILED Result: hostbyte=DID_ERROR driverbyte=DRIVER_OK cmd_age=11s  
[ 8463.934396] sd 0:0:0:0: [sda] tag#21 CDB: Read(10) 28 00 38 84 41 e0 00 01 00 00  
[ 8463.936627] blk_update_request: I/O error, dev sda, sector 948191712 op 0x0:(READ) flags 0x80700 phys_seg 1 prio class 0  
[ 8514.872160] sd 0:0:0:0: [sda] tag#15 FAILED Result: hostbyte=DID_ERROR driverbyte=DRIVER_OK cmd_age=12s  
[ 8514.874534] sd 0:0:0:0: [sda] tag#15 CDB: Read(10) 28 00 e8 e0 88 a0 00 00 08 00  
[ 8514.876828] blk_update_request: I/O error, dev sda, sector 3907029152 op 0x0:(READ) flags 0x80700 phys_seg 1 prio class 0  
[ 8534.871117] sd 0:0:0:0: [sda] tag#14 FAILED Result: hostbyte=DID_ERROR driverbyte=DRIVER_OK cmd_age=12s  
[ 8534.873456] sd 0:0:0:0: [sda] tag#14 CDB: Read(10) 28 00 00 00 00 00 00 00 08 00  
[ 8534.875685] blk_update_request: I/O error, dev sda, sector 0 op 0x0:(READ) flags 0x80700 phys_seg 1 prio class 0  
[ 8542.744970] sd 0:0:0:0: [sda] tag#15 FAILED Result: hostbyte=DID_OK driverbyte=DRIVER_SENSE cmd_age=7s  
[ 8542.747193] sd 0:0:0:0: [sda] tag#15 Sense Key : Hardware Error [current]  
[ 8542.749335] sd 0:0:0:0: [sda] tag#15 Add. Sense: Mechanical positioning error  
[ 8542.751452] sd 0:0:0:0: [sda] tag#15 CDB: Read(10) 28 00 00 00 00 00 00 00 08 00  
[ 8542.753529] blk_update_request: critical target error, dev sda, sector 0 op 0x0:(READ) flags 0x0 phys_seg 1 prio class 0  
[ 8542.755606] Buffer I/O error on dev sda, logical block 0, async page read  
[ 8583.595997] sd 0:0:0:0: [sda] tag#3 FAILED Result: hostbyte=DID_OK driverbyte=DRIVER_SENSE cmd_age=8s  
[ 8583.598111] sd 0:0:0:0: [sda] tag#3 Sense Key : Hardware Error [current]  
[ 8583.600101] sd 0:0:0:0: [sda] tag#3 Add. Sense: Mechanical positioning error  
[ 8583.602068] sd 0:0:0:0: [sda] tag#3 CDB: Read(10) 28 00 00 00 00 00 00 00 08 00  
[ 8583.604007] blk_update_request: critical target error, dev sda, sector 0 op 0x0:(READ) flags 0x0 phys_seg 1 prio class 0  
[ 8583.605987] Buffer I/O error on dev sda, logical block 0, async page read  
[ 8616.894326] sd 0:0:0:0: [sda] tag#0 FAILED Result: hostbyte=DID_ERROR driverbyte=DRIVER_OK cmd_age=152s  
[ 8616.896447] sd 0:0:0:0: [sda] tag#0 CDB: Read(10) 28 00 38 84 40 e0 00 00 08 00  
[ 8616.898498] blk_update_request: I/O error, dev sda, sector 948191456 op 0x0:(READ) flags 0x0 phys_seg 1 prio class 0  
[ 8616.900601] Buffer I/O error on dev sda, logical block 118523932, async page read  
[ 8646.464430] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 FAILED Result: hostbyte=DID_OK driverbyte=DRIVER_SENSE cmd_age=29s  
[ 8646.466591] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 Sense Key : Hardware Error [current]  
[ 8646.468637] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 Add. Sense: Mechanical positioning error  
[ 8646.470696] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 CDB: Read(10) 28 00 00 00 00 00 00 00 08 00  
[ 8646.472757] blk_update_request: critical target error, dev sda, sector 0 op 0x0:(READ) flags 0x0 phys_seg 1 prio class 0  
[ 8646.474883] Buffer I/O error on dev sda, logical block 0, async page read  
[ 8669.149348] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 FAILED Result: hostbyte=DID_OK driverbyte=DRIVER_SENSE cmd_age=126s  
[ 8669.151483] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 Sense Key : Hardware Error [current]  
[ 8669.153392] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 Add. Sense: Mechanical positioning error  
[ 8669.155070] sd 0:0:0:0: [sda] tag#2 CDB: Read(10) 28 00 00 00 00 00 00 00 01 00 00  
[ 8669.156884] blk_update_request: critical target error, dev sda, sector 0 op 0x0:(READ) flags 0x0 phys_seg 32 prio class 0  
[ 8692.157705] sd 0:0:0:0: [sda] tag#0 FAILED Result: hostbyte=DID_OK driverbyte=DRIVER_SENSE cmd_age=2s  
[ 8692.160016] sd 0:0:0:0: [sda] tag#0 Sense Key : Hardware Error [current]  
[ 8692.162239] sd 0:0:0:0: [sda] tag#0 Add. Sense: Mechanical positioning error
```

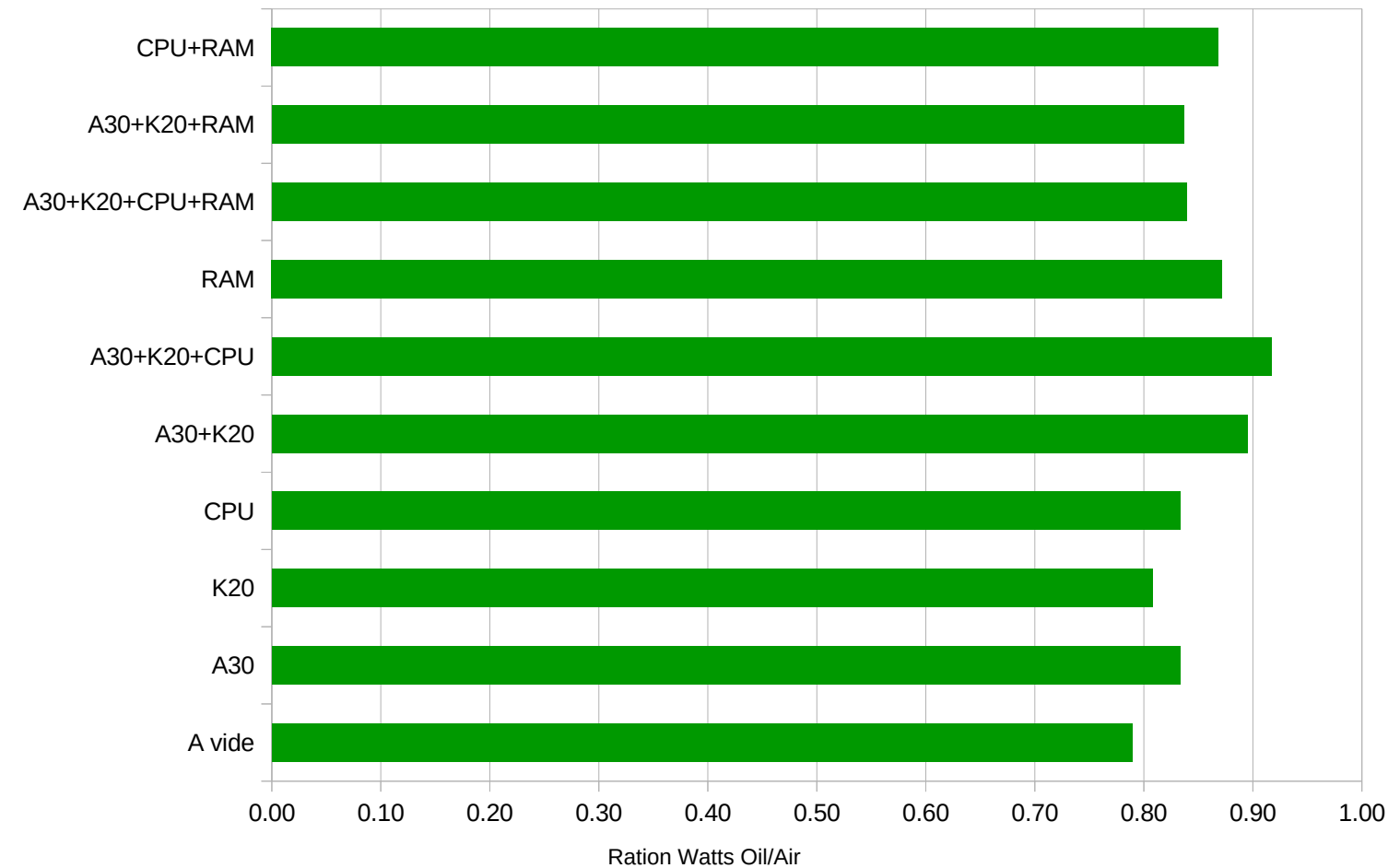
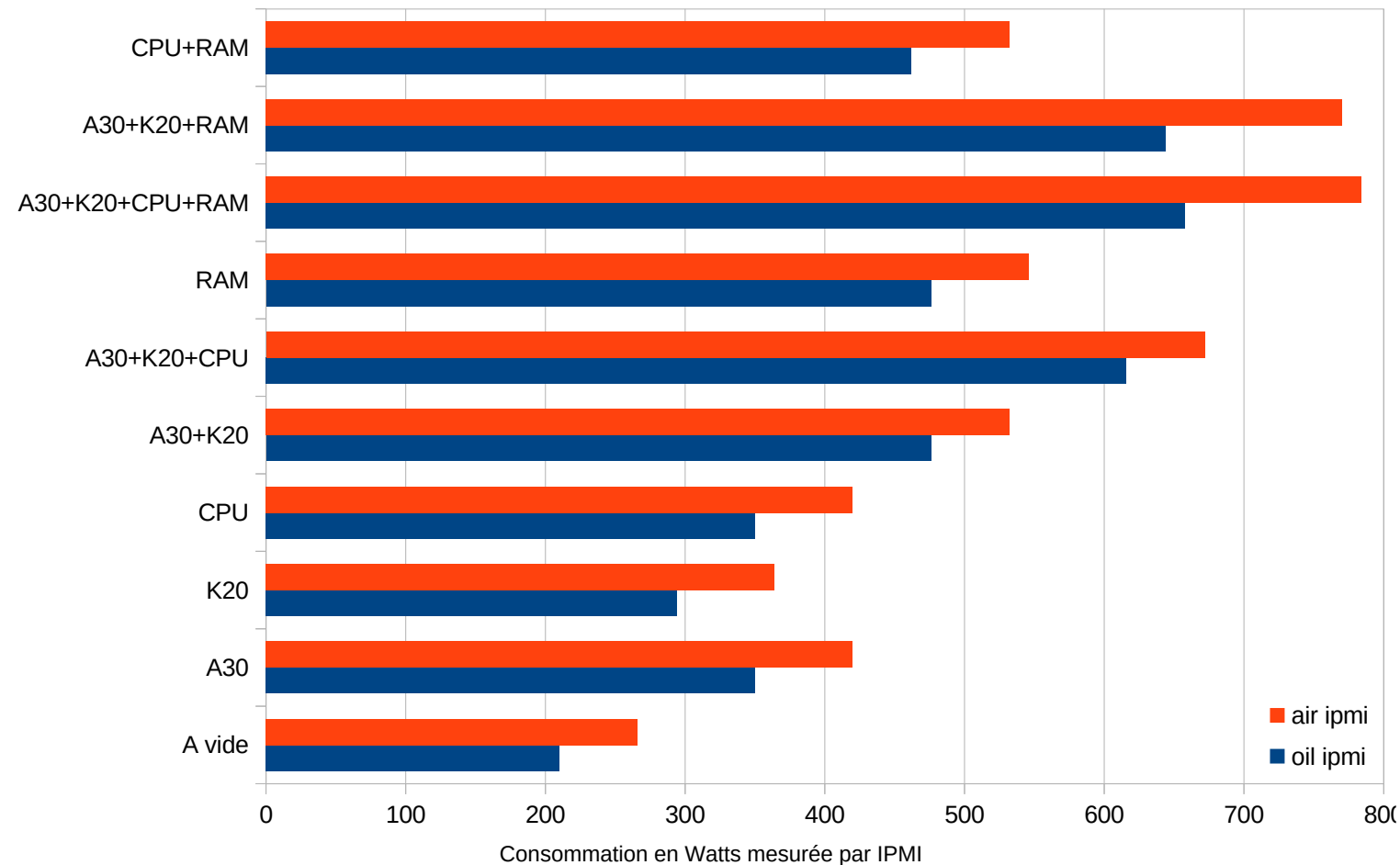
Septembre 2022 : nouveau bac, nouvelle huile...

Nouveau serveur, nouvelle GPU A30

- Banc d'essai : 2 Dell R720 équipés de...
 - CPU : 2 Intel E5-2670 8 coeurs, 95 W de TDP
 - RAM : 384 GB de RAM (24x16 GB)
 - Carte H310 (pour l'étude du stockage ;-)
 - 2 GPU : un Nvidia K20m (Equip@Meso, 225 W) et un Nvidia A30 (prêt Nvidia, 165 W)
- Expérimentations : Nbody & PiDartDash pour CPU/GPU, mbw pour RAM
 - A vide... (réglage des BIOS en « performance » pour les CPU, boost possible, mode HT)
 - Sans la RAM : A30, K20m, CPU, A30+K20m, A30+K20m+CPU
 - Avec la RAM : mbw, mbw+A30+K20m, mbw+CPU, mbw+A30+K20m+CPU
- Métriques : performances, consommation (relève via IPMI)

Septembre 2022 :

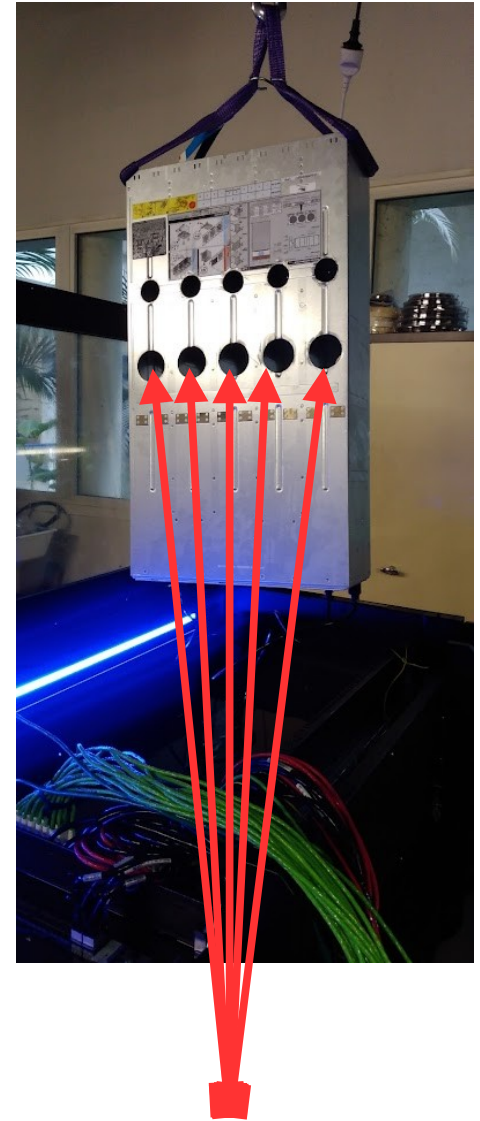
comparaison air/huile : ça consomme moins !



- A vide, 21 % de moins.
- En charge, entre 8 % et 19 % de moins. Influence significative de la RAM !

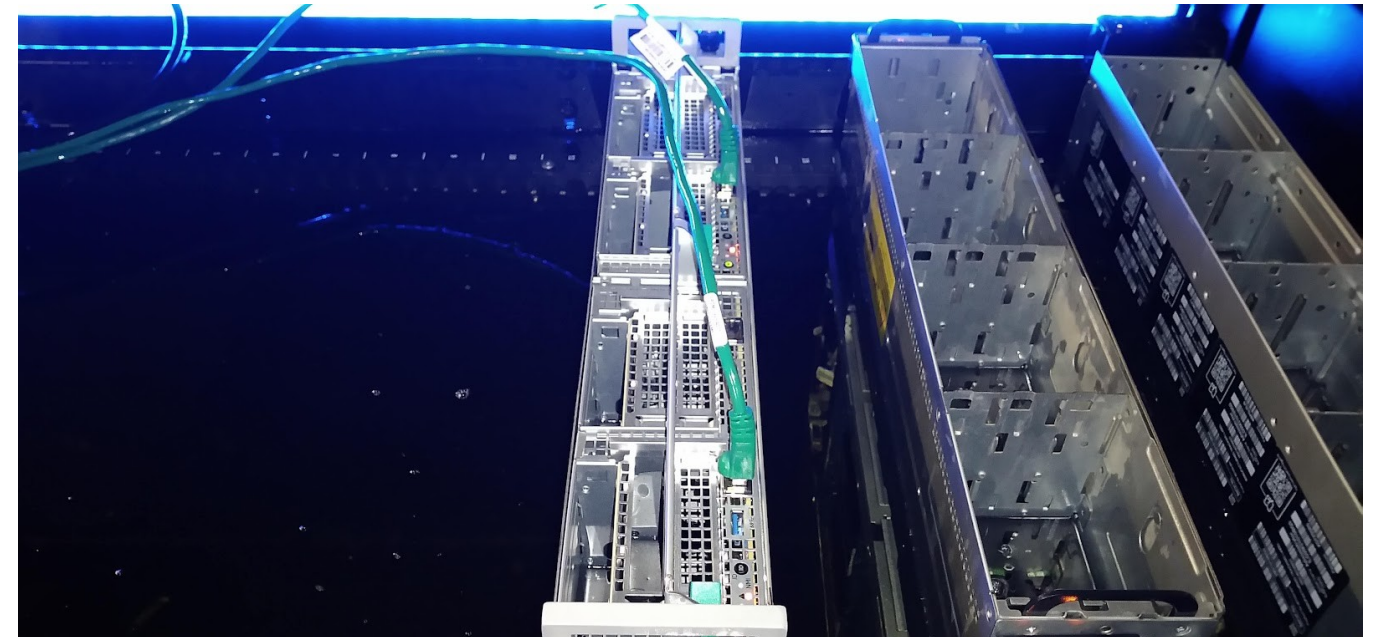
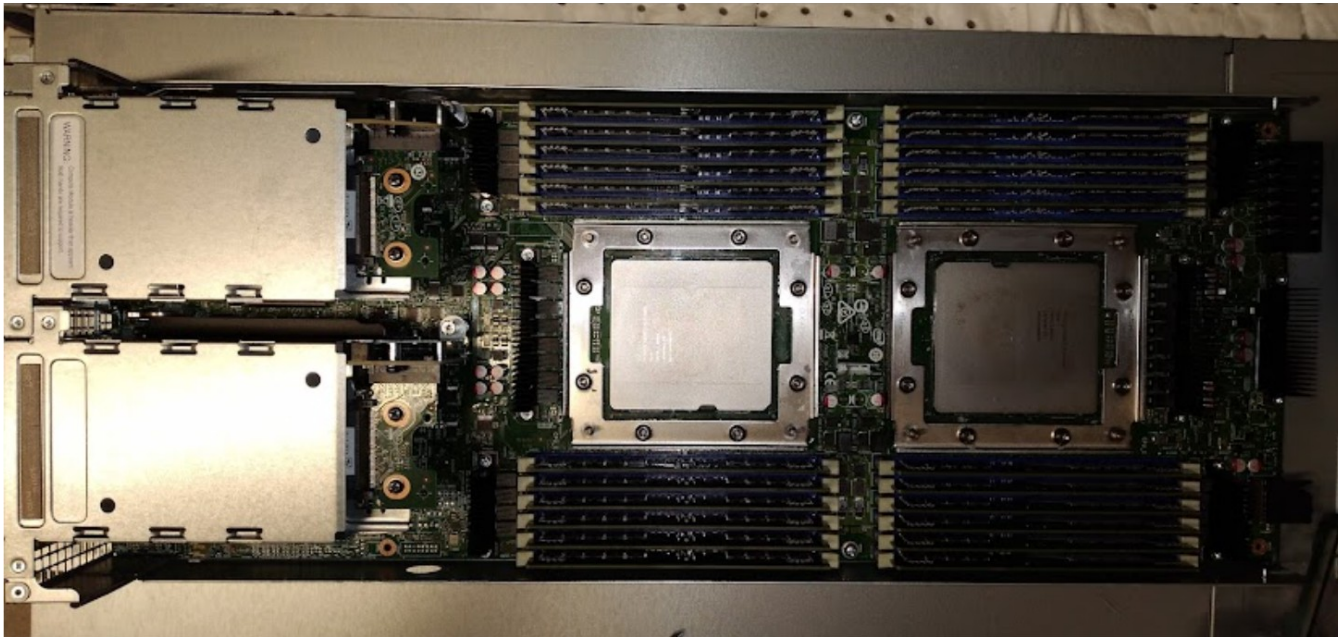
Depuis fin 2022 : préparation (générale) A chaque (classe de) machine, son protocole...

- Jusqu'à fin 2023 : « supprimer » comme seules « actions »
 - Supprimer la pâte thermique, ventilateurs, « guides » plastiques
- Maintenant : « adapter » comme « exigence cardinale »
 - Retourner les ventilateurs : mauvaise orientation du flux
 - Modifier les cartes de supervision : « faire accepter » des ventilateurs absents
 - Fixer les nœuds verticalement : renforcer des crochets de retenue « inadaptés »
- Mais un problème récurrent : profondeur limitée du SmartpodXL
 - Percer les chassis pour améliorer la circulation du fluide (sur chassis C8220)



Dès 2023: immergées, des machines « voraces » : le futur du HPC...

- 2U & 4 sockets Platinum 9242 à la TDP de 350W (& 48 barrettes de RAM)



- Un cas « typique » des « futures » machines HPC :
 - Des processeurs très dissipatifs (+ de 350W par socket)
 - Des barrettes mémoire nombreuses et voraces (DDR5 : 10W par barrette)

Objectifs de la collaboration :

Qualification « opérationnelle » de l'huile !

- Évaluer le fonctionnement d'équipements informatiques classiques immergés dans l'huile DC Cooling Biolife 4 à température "ambiante" (entre 20°C et 30°C).
- **Évaluer le fonctionnement d'équipements informatiques classiques immergés dans l'huile DC Cooling Biolife 4 à différentes températures avec détermination d'une température limite.**
- **Évaluer la réponse temporelle de la température des composants dissipatifs CPU ou GPU à la charge et à la décharge, notamment en comparant avec une huile de concurrent.**
- Évaluer le raidissement des câbles à l'immersion sur des périodes d'une semaine à un mois.

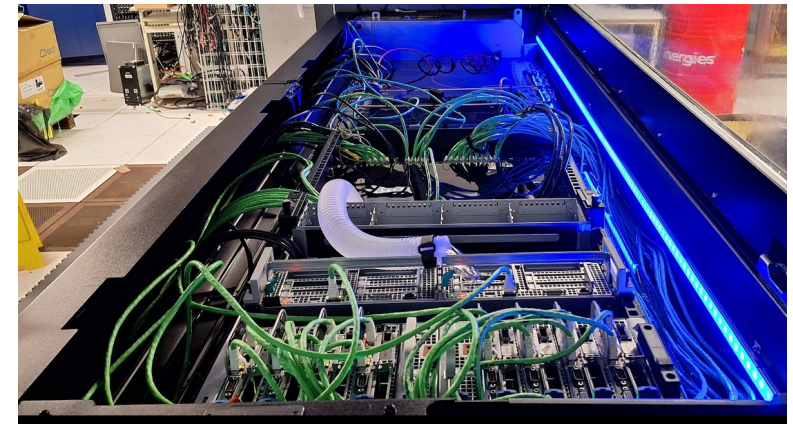
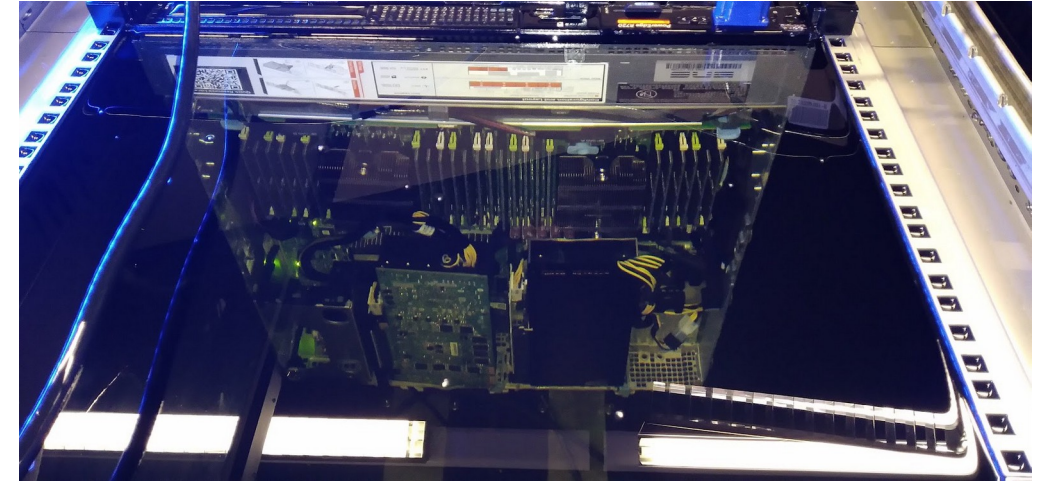
Le banc d'essai : éléments matériels

- Bac Submer SmartpodXL opérationnel en septembre 2022

- Refroidissement en eau froide par le circuit du Data Center
- Huile initiale Shell S5X

- Equipements informatiques :

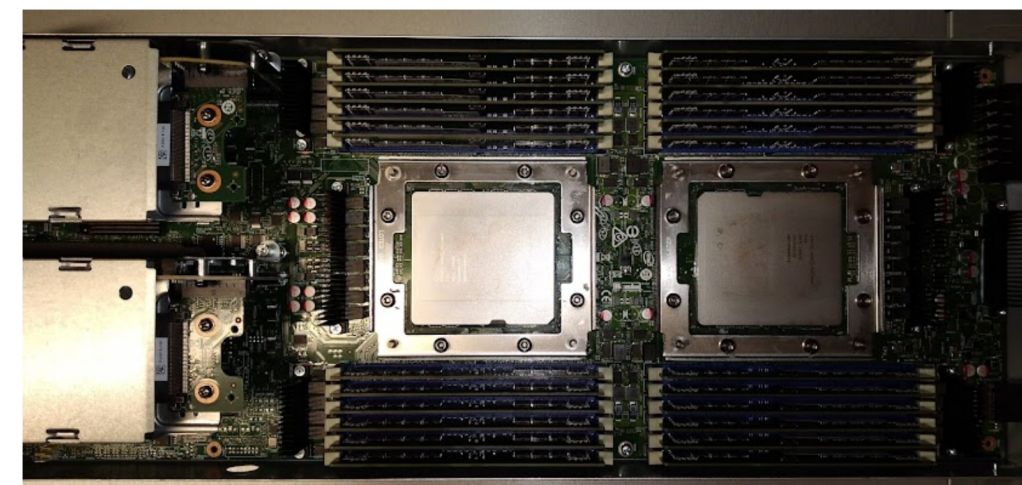
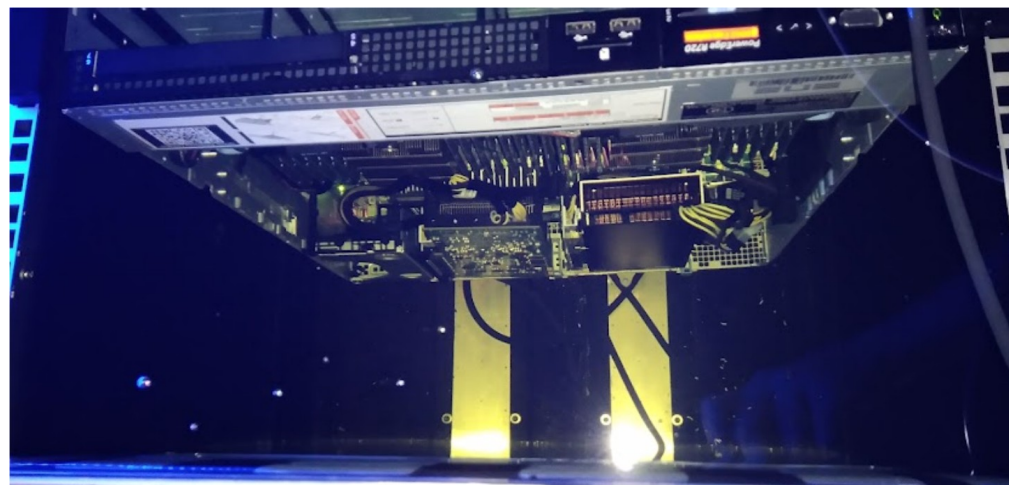
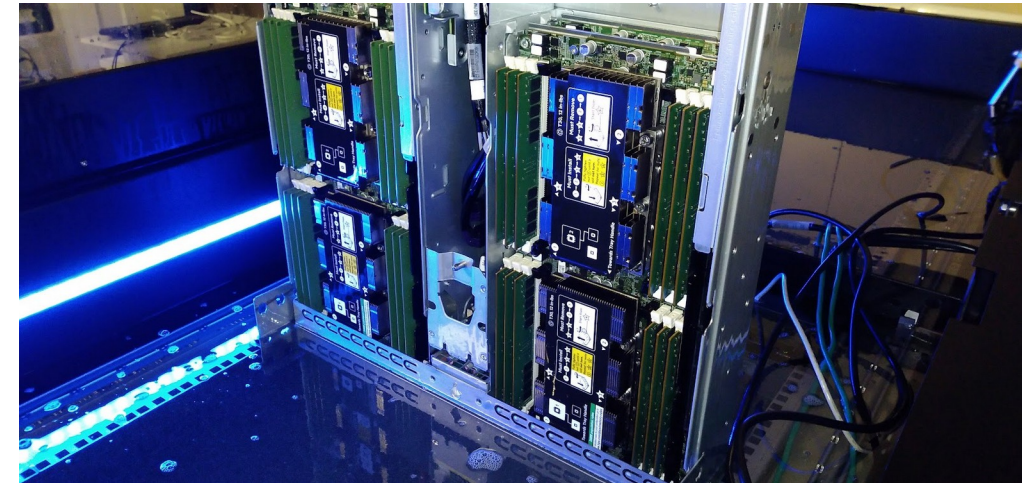
- 2 commutateurs Gigabit Ethernet, 1 commutateur InfiniBand
- 8 nœuds Dell C8220, bisockets E5-2667v2 avec 128GB ou 256 GB de RAM
- 4 nœuds HPE XL170R, bisockets Gold 5218 avec 128GB de RAM
- 2 nœuds Intel S9200, bisockets Platinum 9242 avec 384GB de RAM
- 1 serveur Dell R720 avec GPGPU Nvidia K20m et Nvidia A30
- **Et les 15 « mêmes » machines dans le Data Center ENS**
 - Pour suivre l'adage « science sans référence n'est que discipline qui crame ! »



Banc d'essai pertinent ?

Des machines denses & « dissipatives »

8 nœuds dans 4U & réseau façade, 4 nœuds dans 2U & réseau arrière



Serveur avec 2 GPGPU Nvidia, serveurs avec 2 CPU de 350W

Objectif #2 : étude plusieurs températures

- Protocole :

- relève des températures de l'huile entrante et sortante sur l'échangeur du SmartpodXL
- vérification de fonctionnement des machines à vide
- relève des températures internes des équipements (CPU, RAM, GPU, Inlet)
- mise en charge des machines suivant les « tests de charge » pour une durée définie
- vérification de fonctionnement des machines
- relève des températures internes des équipements (CPU, RAM, GPU, Inlet)
- relève des températures de l'huile entrante et sortante sur l'échangeur du SmartpodXL

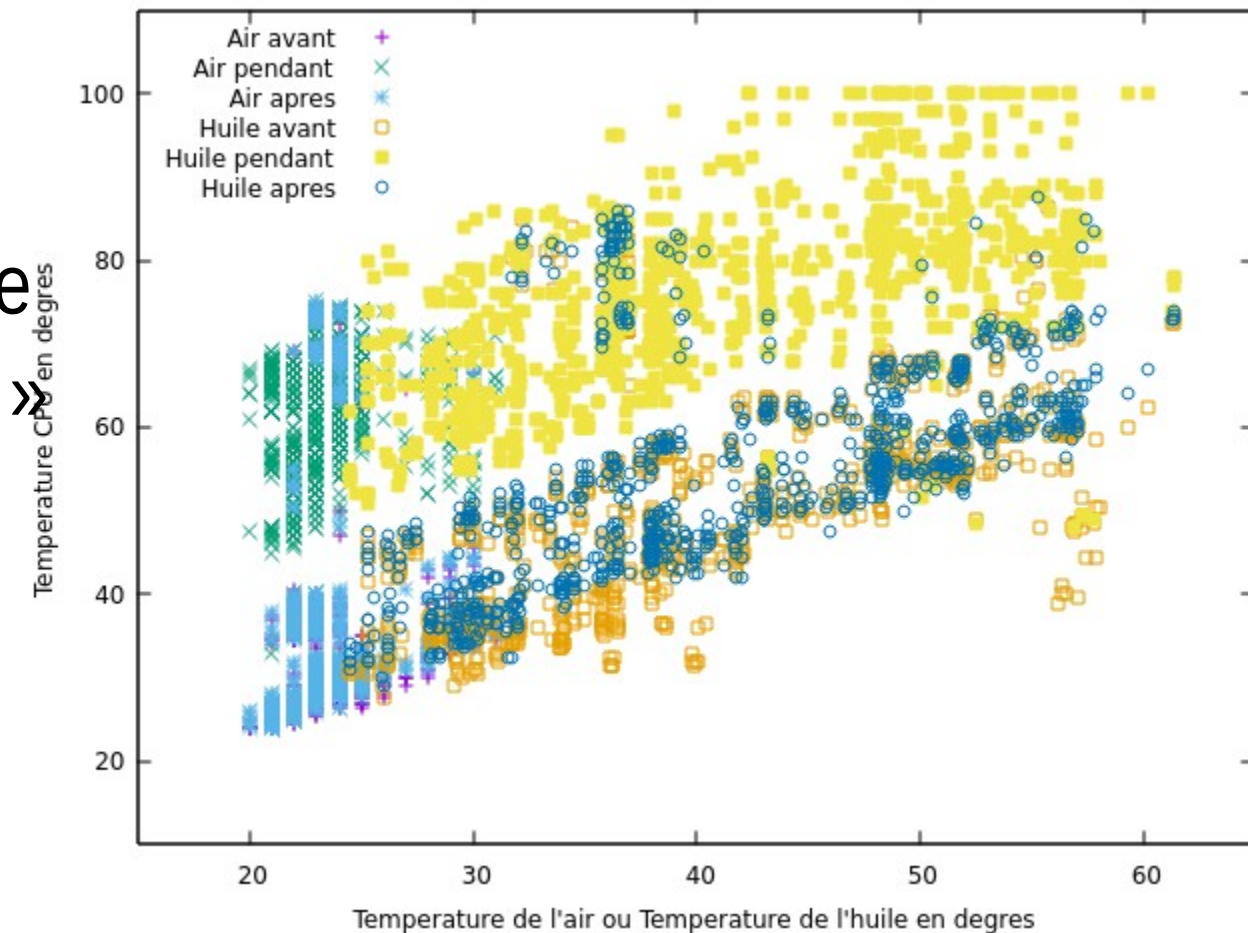
- Livrables :

- Diagramme température huile / température CPU
- Diagramme température huile / temps d'exécution

Objectif #2 : étude à différentes températures

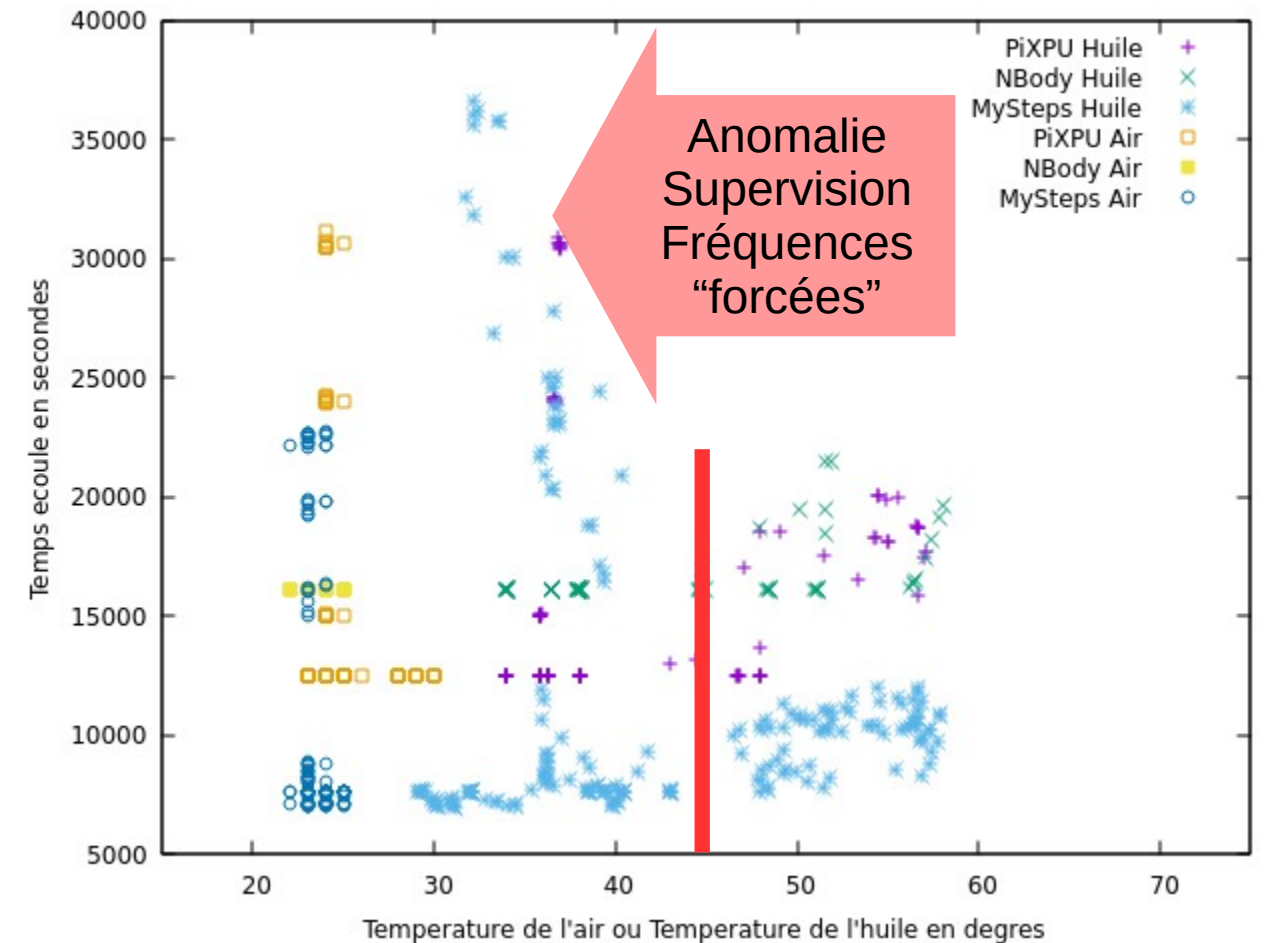
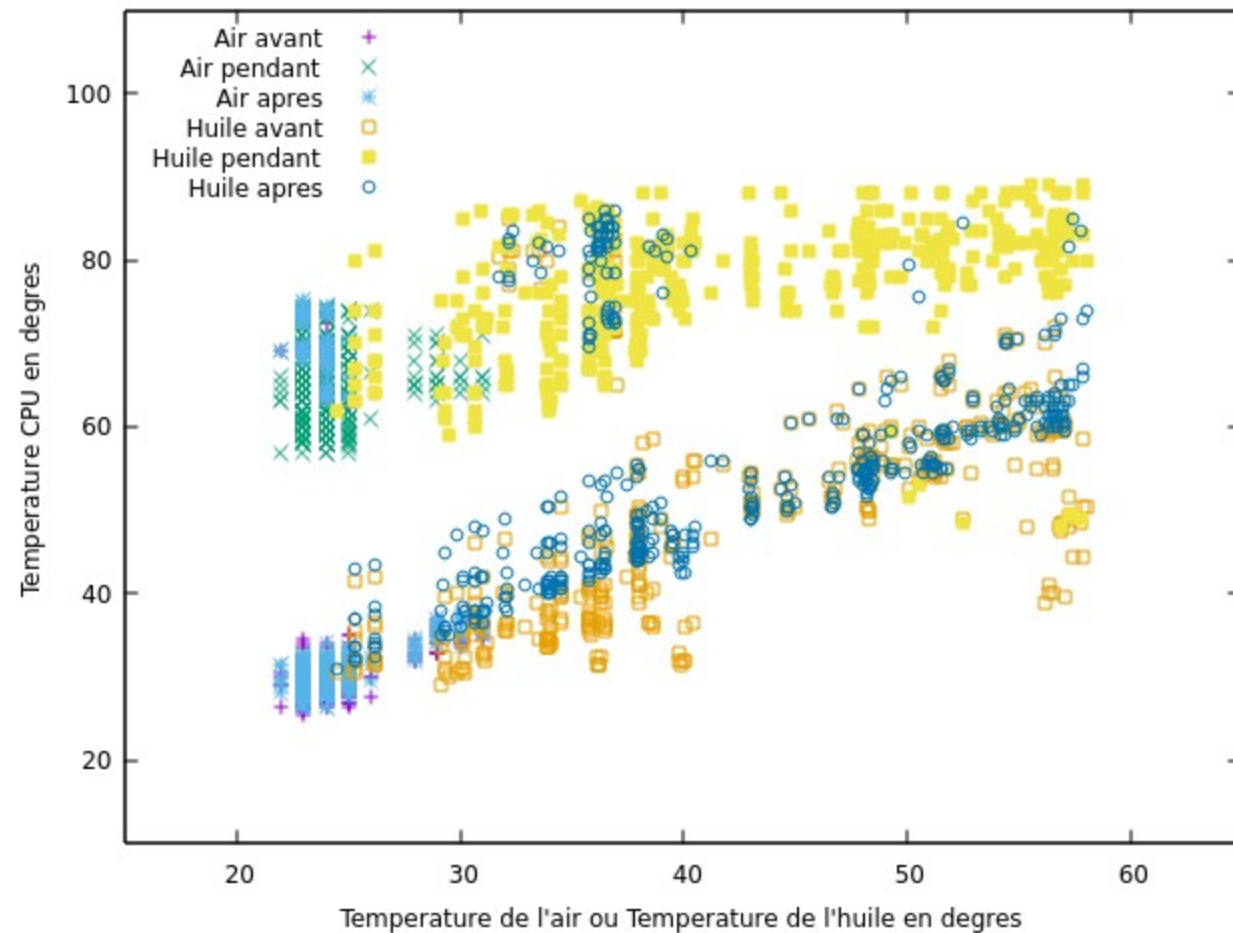
températures de CPU versus huile

- Près de 1800 expérimentations sur les 28 machines (14 air et 14 huile)
 - Contrôle de la température d'huile « difficile »
 - Pas de contrôle fin de la température de l'huile
 - Forçage de la température par arrêt de la pompe
 - Comportement de la supervision avec « protection »
- Nécessité de séparer les populations
 - « Comportement » sur charge/décharge :
 - Différence entre grappes
 - Différence entre nœuds d'une même grappe
- Températures maximales « en charge » très élevées



Objectif #2 : étude à différentes températures pour les 8+8 nœuds de cluster « anciens »

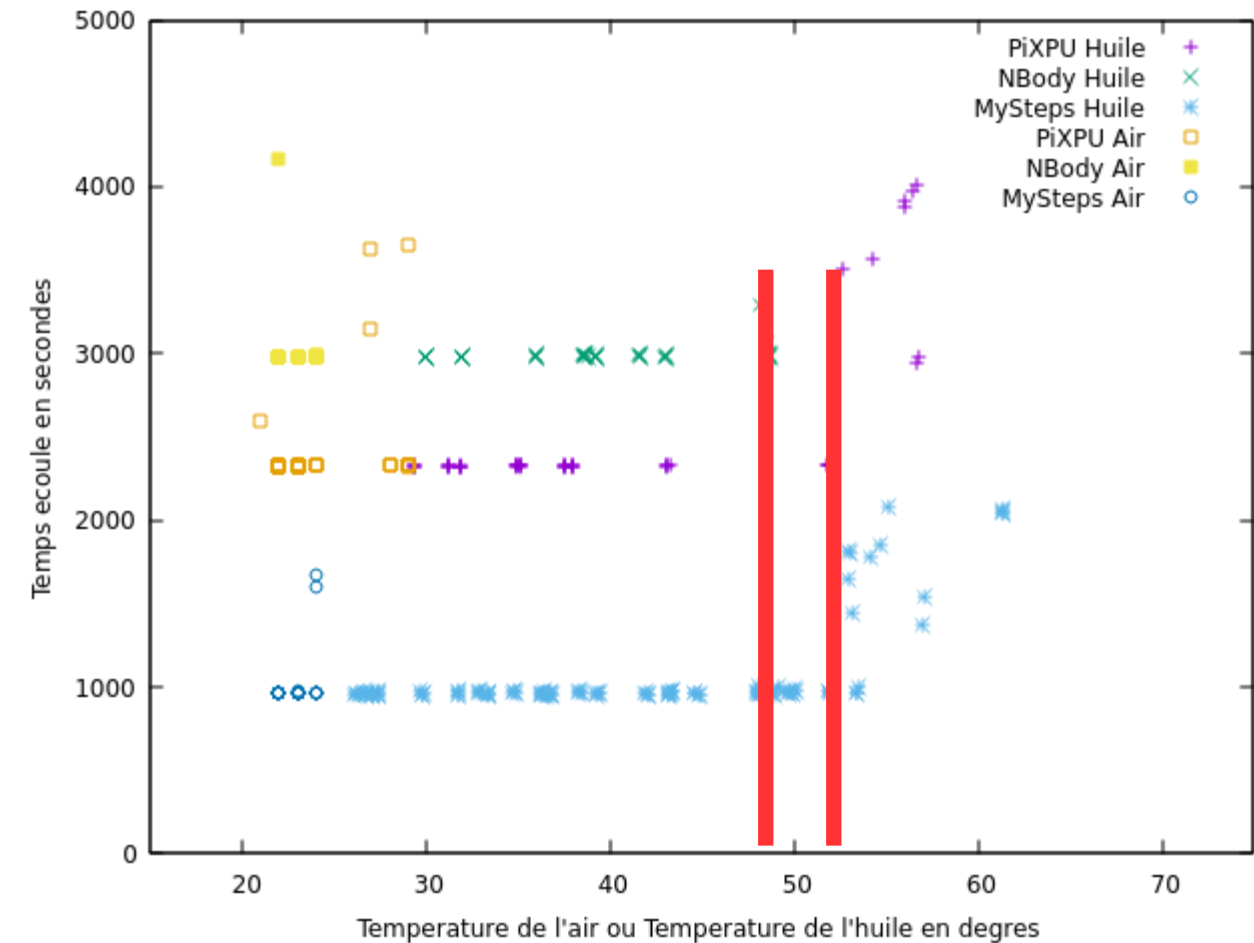
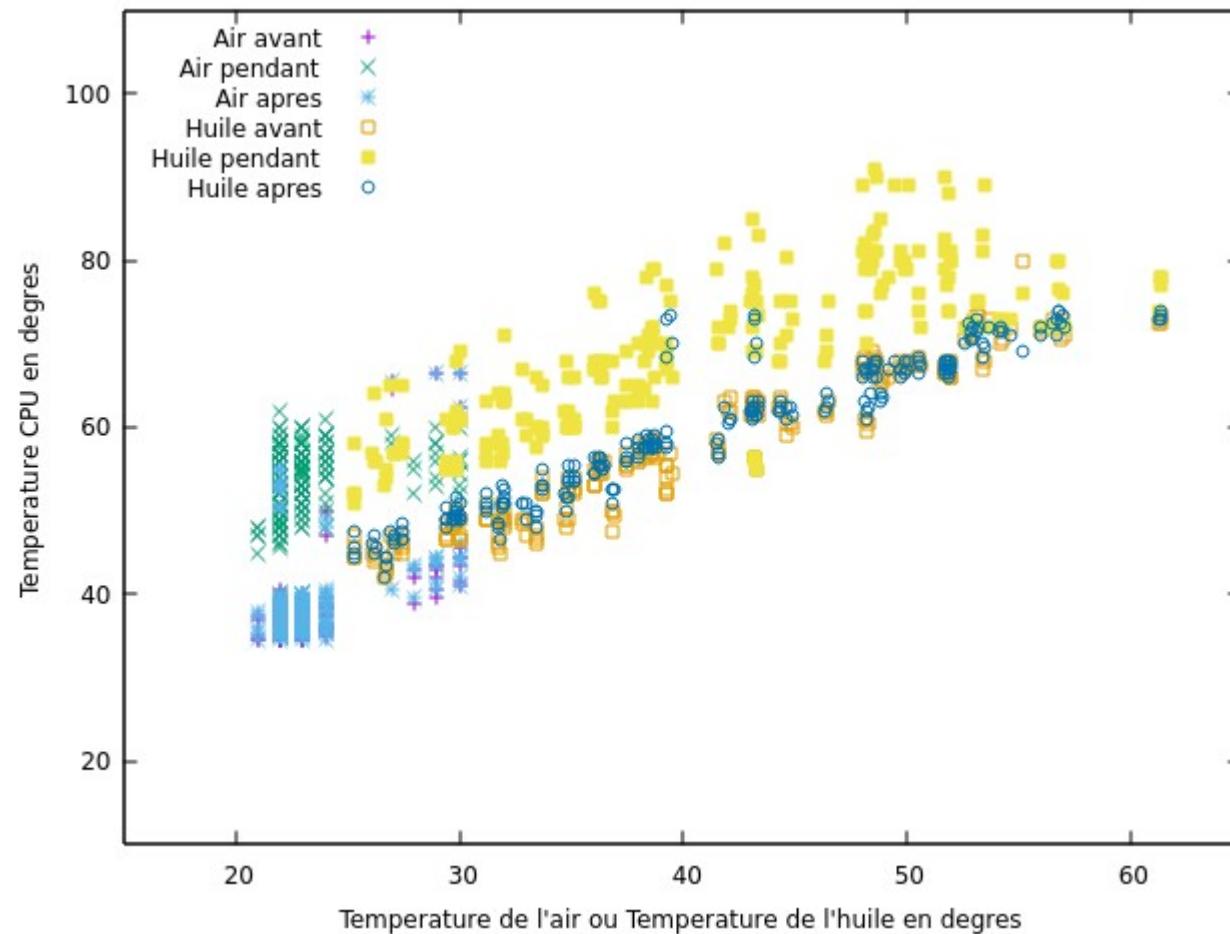
- Pour les deux ensembles de 8 nœuds : forte variabilité des températures...



- Dégradation des performances de calcul pour une huile > à 45°C

Objectif #2 : étude à différentes températures pour les 4+4 nœuds de cluster « récents »

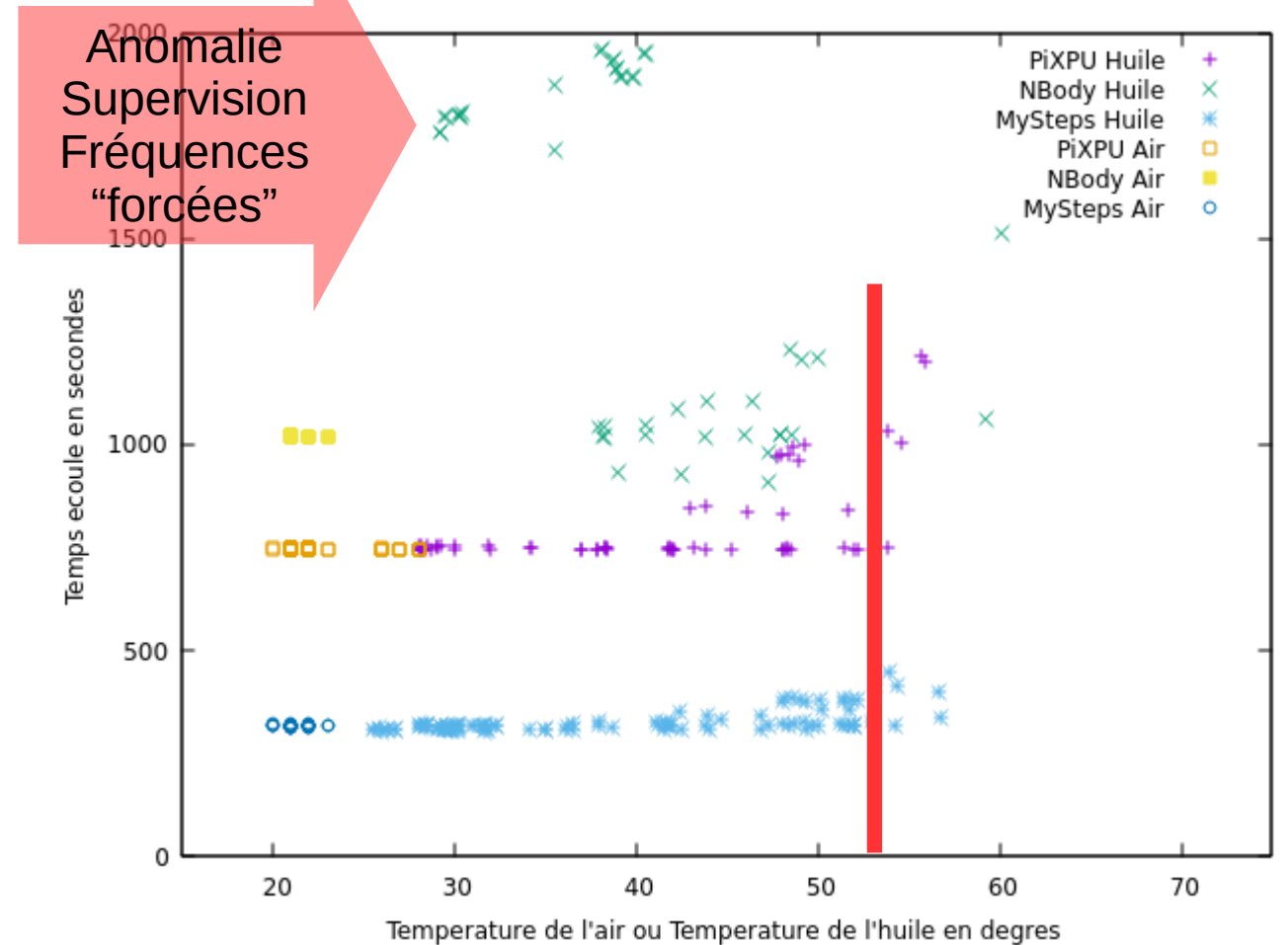
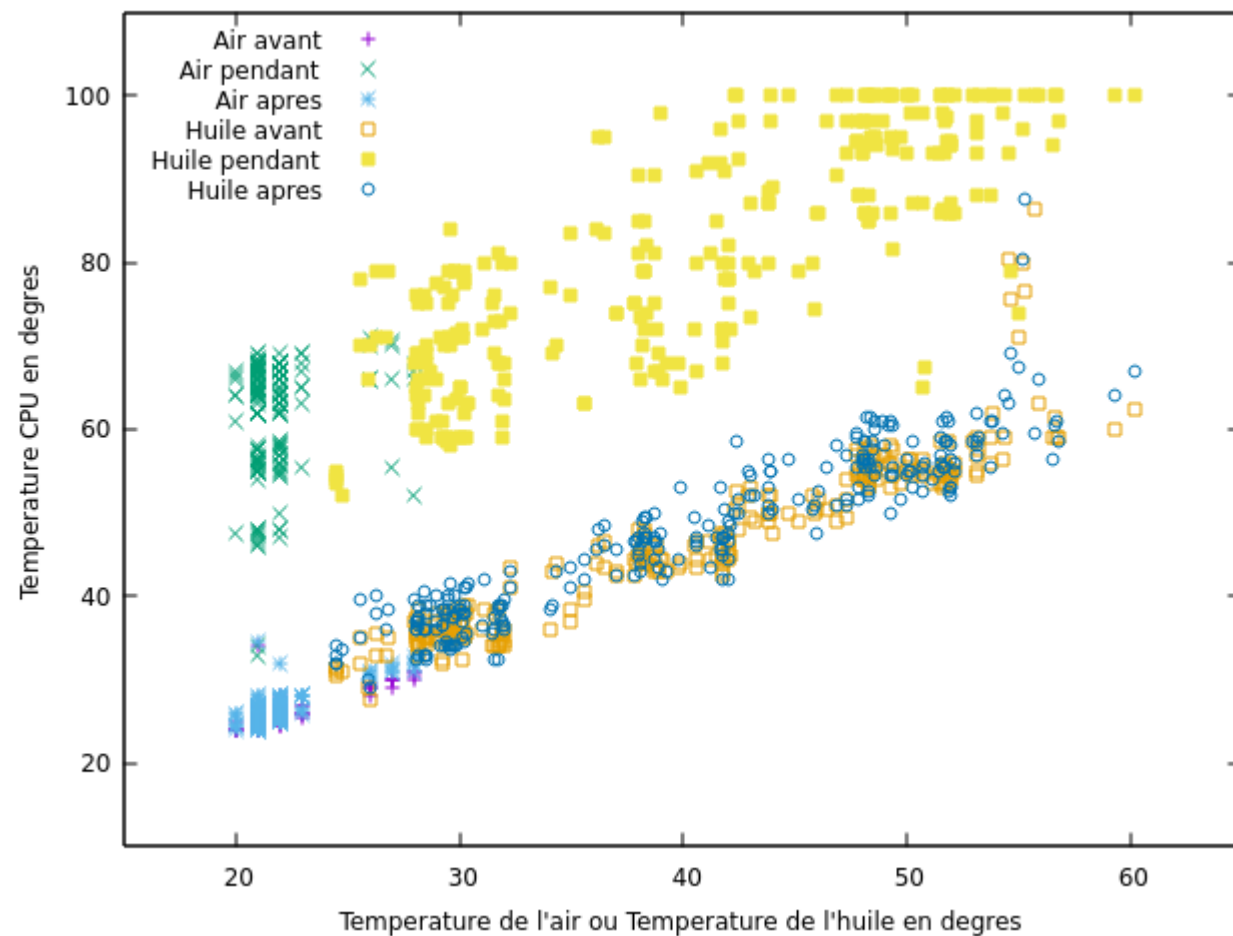
- Pour les deux ensembles de 4 nœuds : variabilité de la t° moins marquée...



- Dégradation des performances de calcul pour une huile $>$ à (48°C à 52°C)

Objectif #2 : étude à différentes températures pour les 2+2 couples de serveurs « dissipatifs »

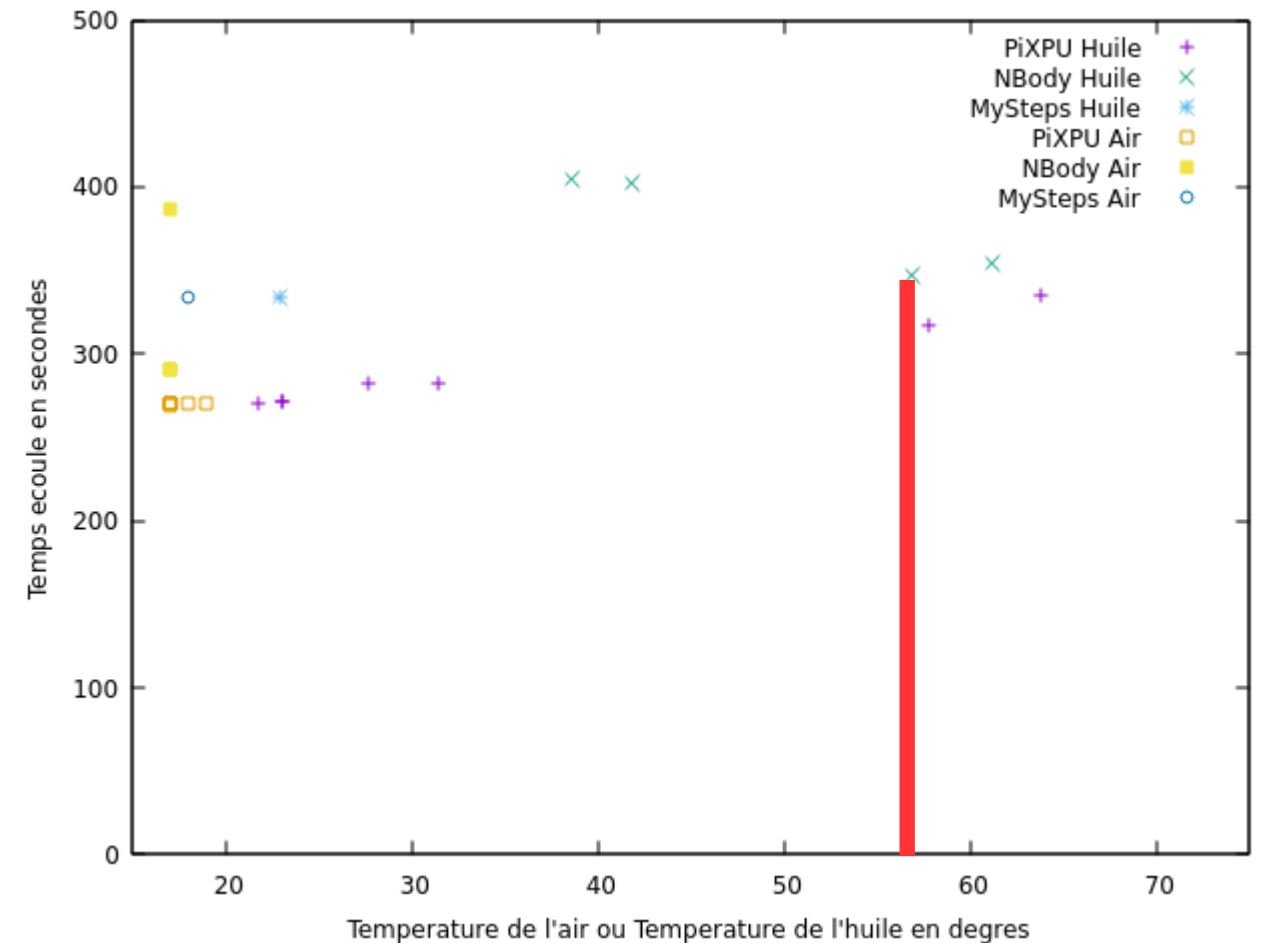
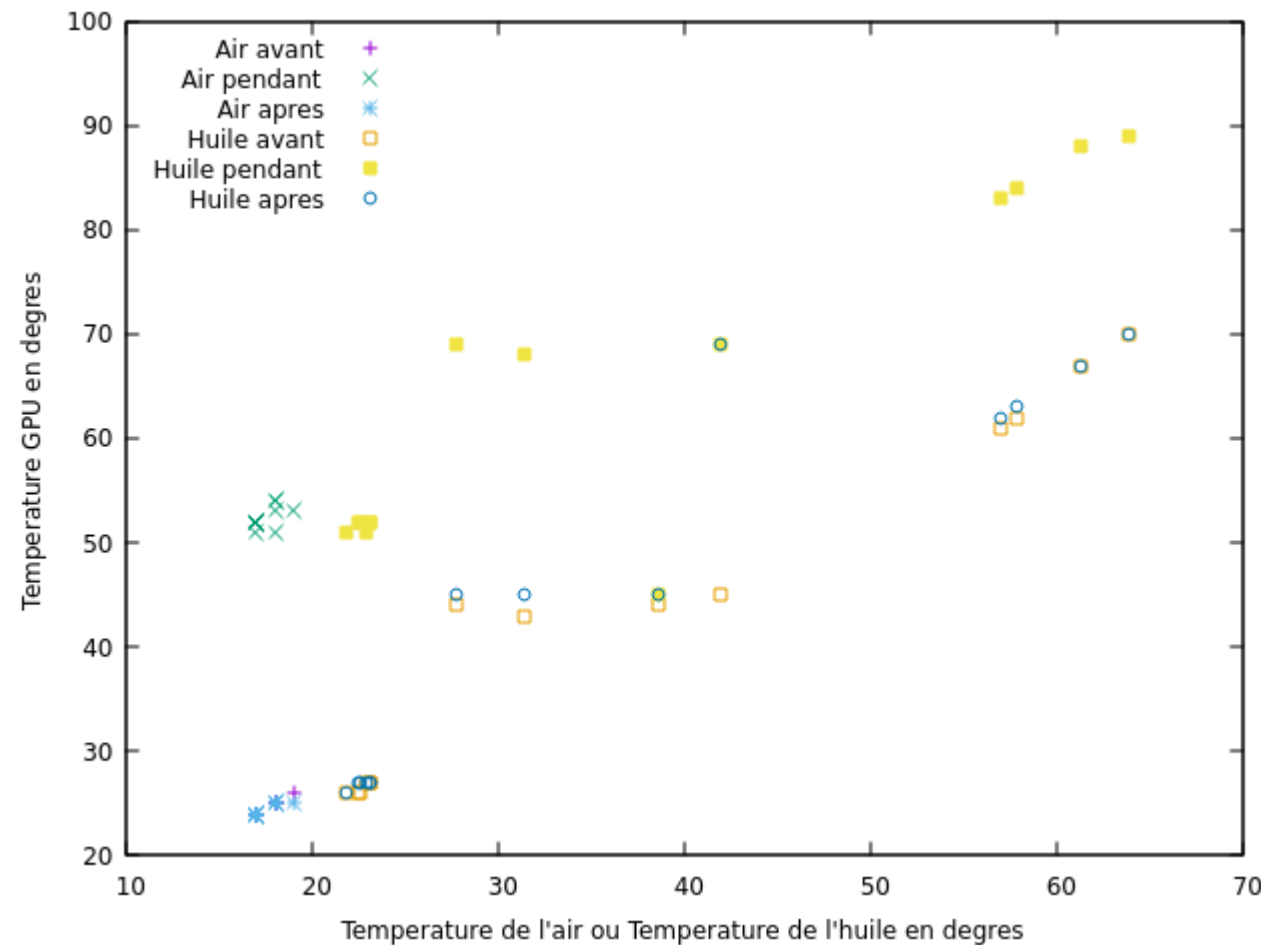
- Pour les deux ensembles de 2 nœuds : variabilité de la t° très marquée...



- Dégradation des performances de calcul pour une huile > à (45°C à 55°C)

Objectif #2 : étude à différentes températures pour le serveur à GPGPU A30

- Pour les 2 GPGPU A30 : les deltas en charge sont identiques...



- Dégradation légère des performances de calcul pour une huile > à 55°C

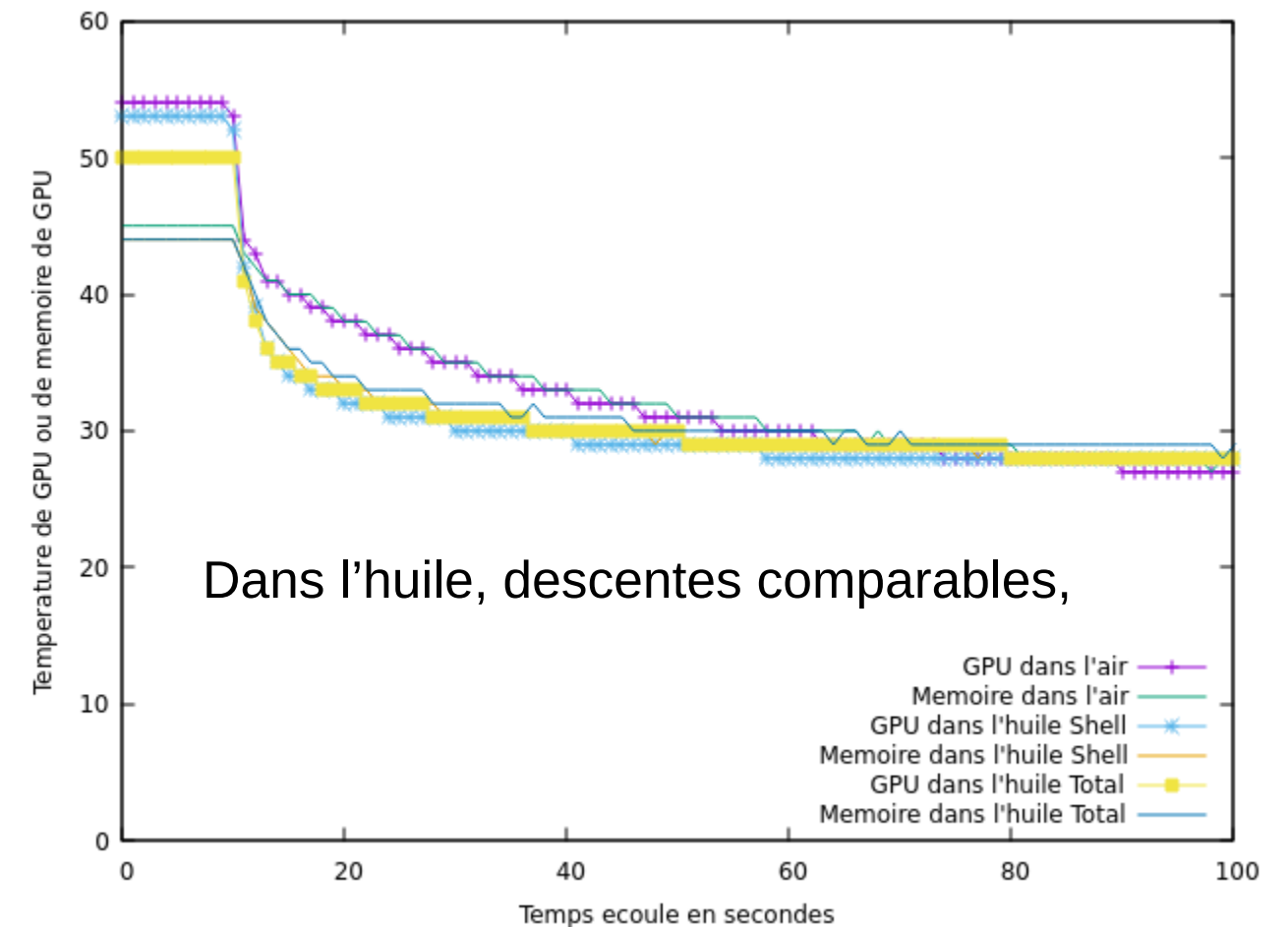
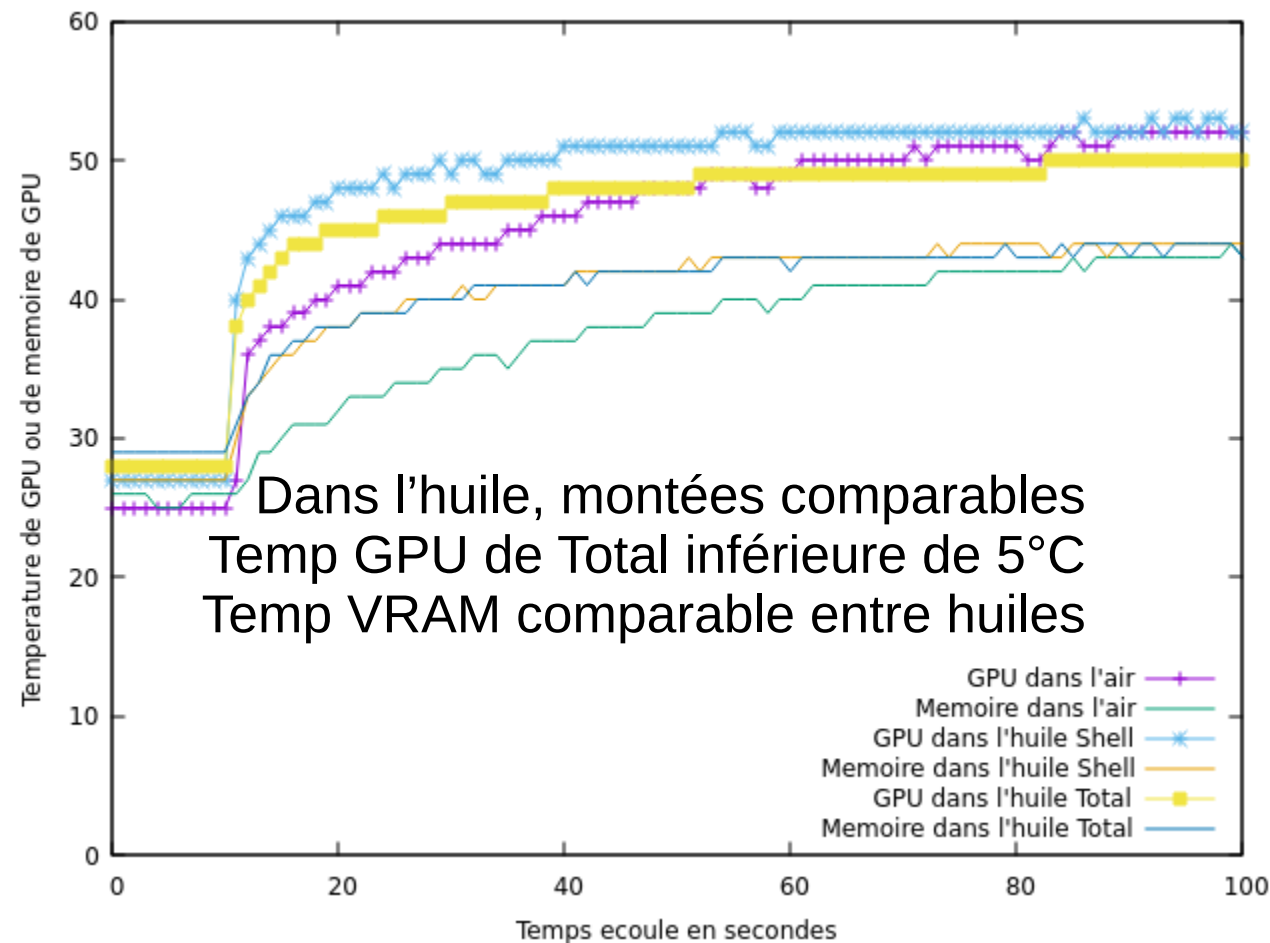
Objectif #3 : mesure de l'inertie thermique

- Deux volets :
 - Étude comparative entre air, huile Shell S5X et huile Total DC-C-BL4 sur GPU
 - Étude comparative entre air et huile Total DC-C-BL4 sur CPU, avec ou sans « forçage »
- Protocole comparable mais des différences notables
 - Sur GPU avec les deux huiles :
 - Mesures de la température à 1 Hz
 - Programmes PiXPU, Nbody et MySteps dans le rapport, illustration avec PiXPU
 - Sur CPU avec les deux approches avec & sans « forçage »
 - Mesures de la température à 0.2 Hz
 - Programme PiXPU

Objectif #3 : mesure de l'inertie thermique

Comparaison avec l'huile Shell S5X

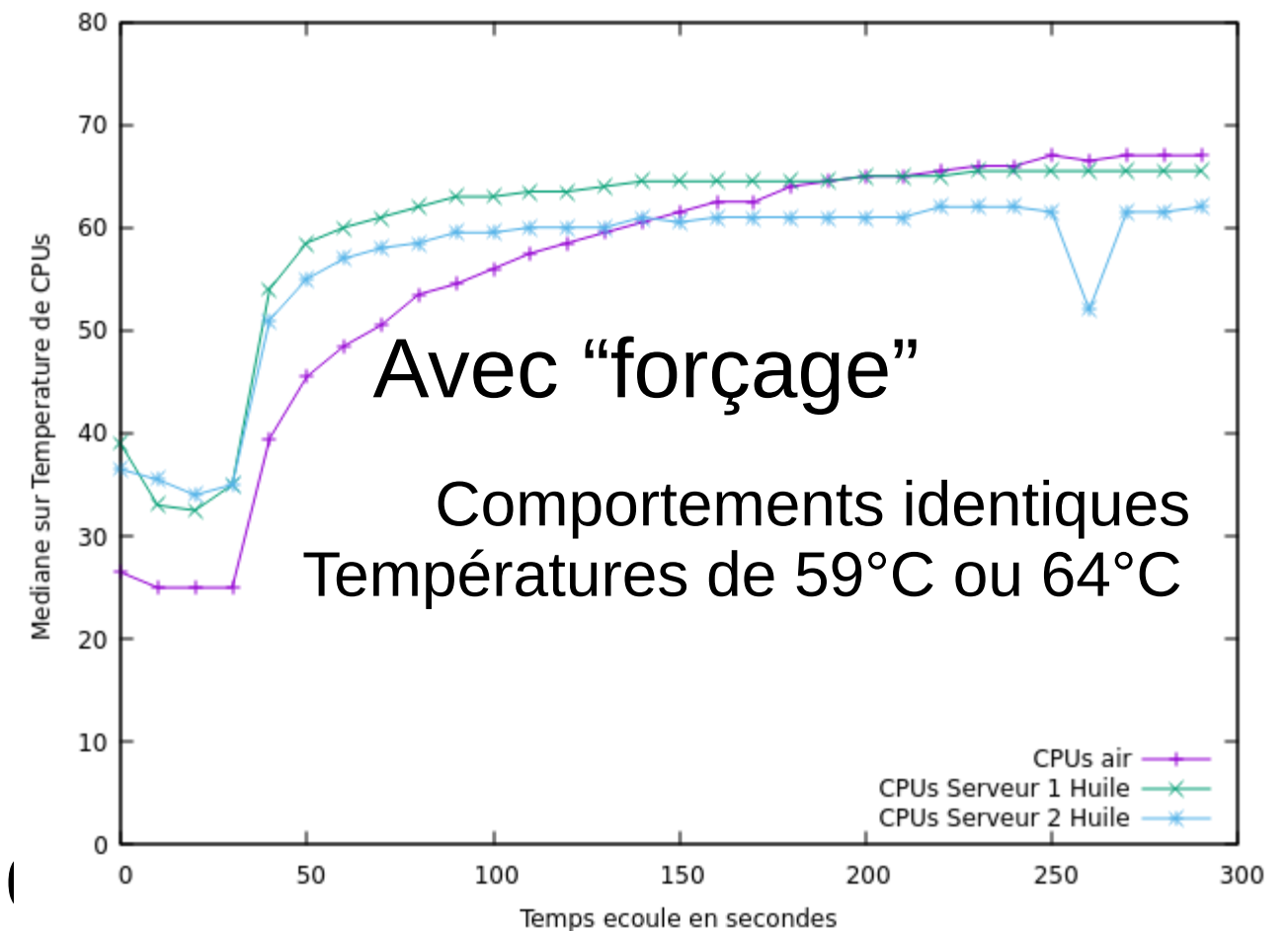
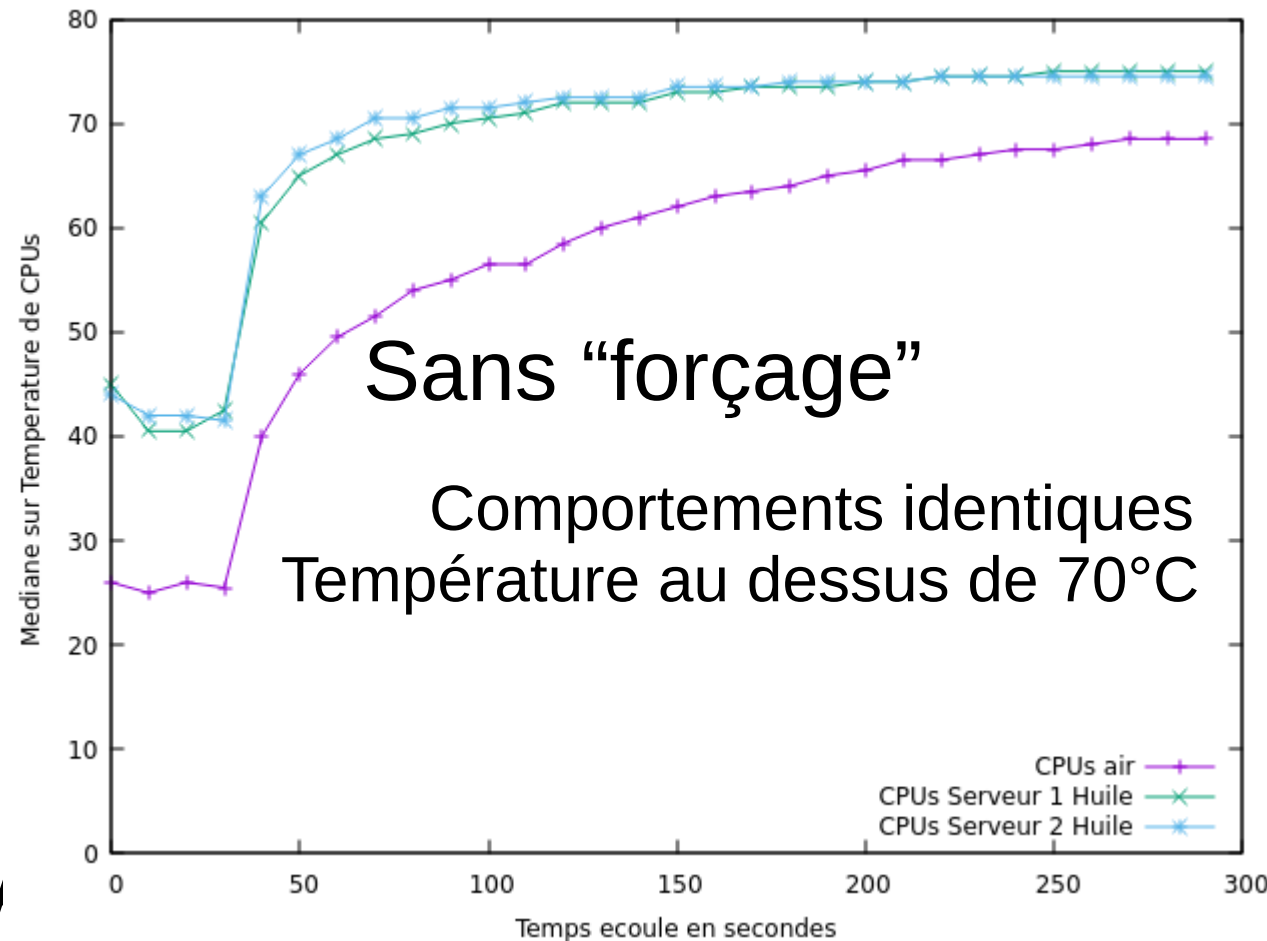
- Montée et descente en température de GPU et VRAM dans l'huile et l'air



- Huile Total Energies meilleure que Shell : température GPU inférieure !

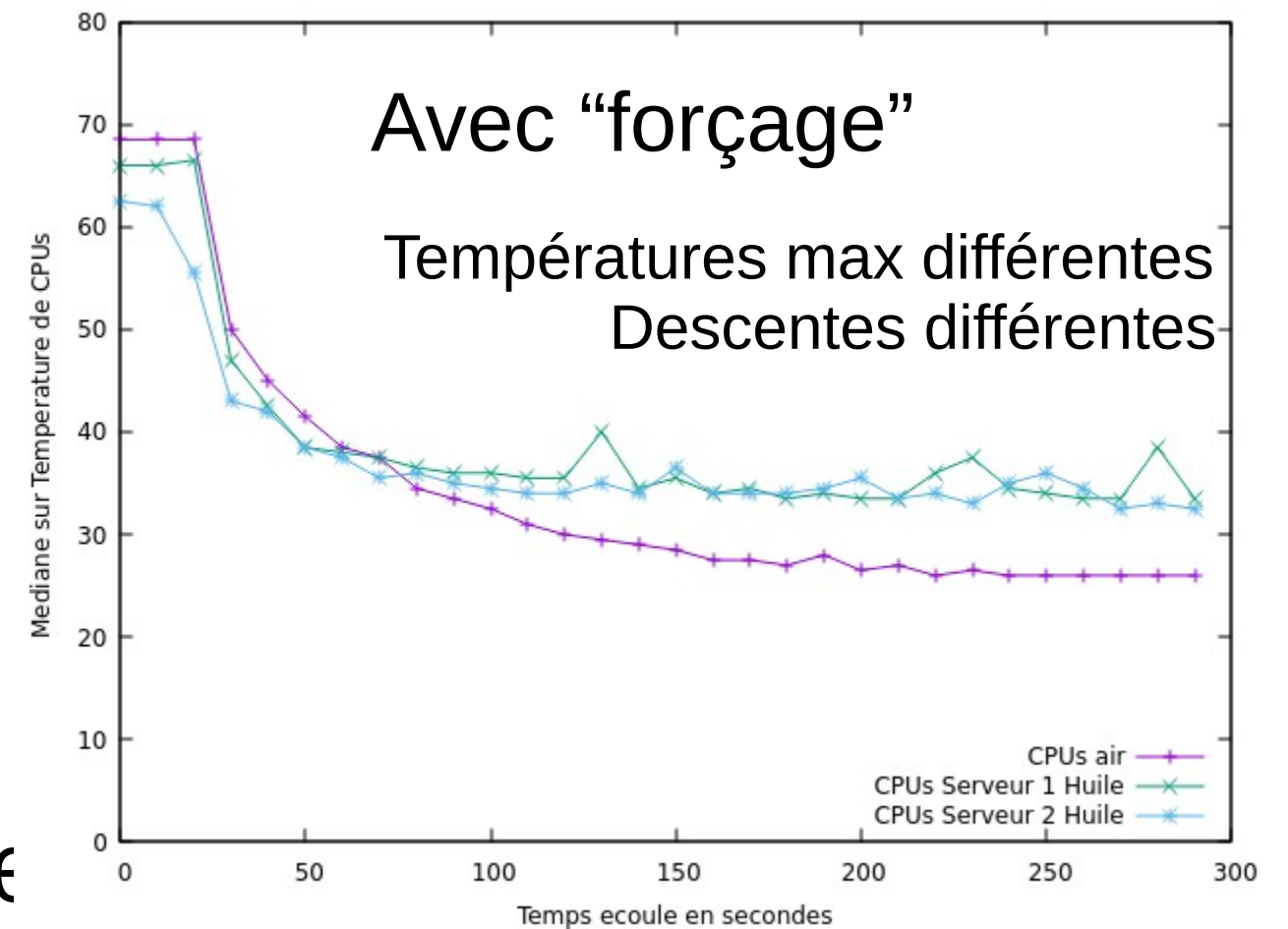
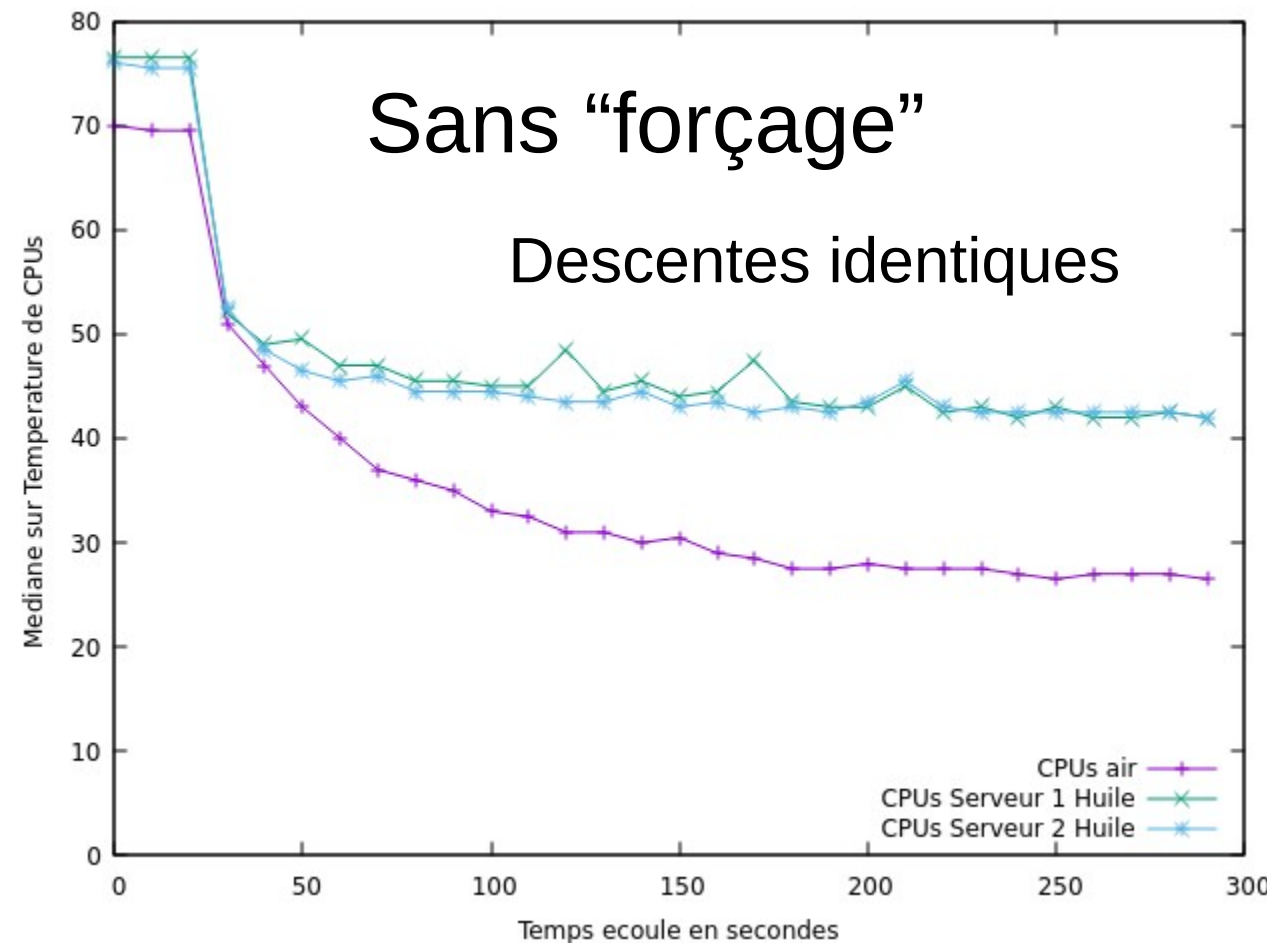
Objectif #3 : mesure de l'inertie thermique Sans ou Avec forçage d'huile en façade

- « Forçage » : adduction d'huile par déversement d'une pompe de filtrage



Objectif #3 : mesure de l'inertie thermique Sans ou Avec forçage d'huile en façade

- Lors de la descente, différences de comportement avec & sans « forçage »



ique

Et « hic et nunc » : 19 machines

736 coeurs, 2 GPU, 6TB de RAM

Accessible H24 7J/7 à près de 2000 personnes sur Cloud@CBP

Hostname	SIDUS	AvgLoad	Users	Cores	Memory	Frequency	FreeLocal	Model	GPUModel1
c8220oil6	trixie64nfs	0.4	0	16	125	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
c8220oil3	trixie64nfs	0.1	0	16	251	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
c8220oil5	trixie64nfs	0.24	0	16	125	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
c8220oil4	trixie64nfs	0.12	0	16	251	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
c8220oil8	trixie64nfs	0.21	0	16	125	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
c8220oil1	trixie64nfs	0.1	0	16	251	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
c8220oil7	trixie64nfs	0.12	0	16	125	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
asustek4oil1	trixie64nfs	0.11	1	64	503	3400	856	Intel Xeon Platinum 8358	None
platinum4oil1	trixie64nfs	2.3	1	96	376	3800	869	Intel Xeon Platinum 9242	None
apollo4oil3	trixie64nfs	0.59	1	32	172	3900	0	Intel Xeon Gold 5218	None
asustek4oil2	trixie64nfs	64.08	1	64	503	3400	827	Intel Xeon Platinum 8358	None
c8220oil2	trixie64nfs	0.22	1	16	251	4000	0	Intel Xeon E5-2667 v2	None
platinum4oil2	trixie64nfs	0.12	1	96	376	3800	872	Intel Xeon Platinum 9242	None
r6625oil	bookworm64nfs	128.25	2	128	1511	2400	4522	AMD EPYC 9534	None
gold4oil	trixie64nfs	0.28	2	16	124	3900	763	Intel Xeon Gold 6242	GA102 [RTX 3080]
nvidia4oil	trixie64nfs	0.28	2	16	377	3300	0	Intel Xeon E5-2670 0	GA100GL [A30 PCIe]
apollo4oil1	trixie64nfs	55.17	2	32	188	3900	0	Intel Xeon Gold 5218	None
apollo4oil4	trixie64nfs	50.02	3	32	172	3900	0	Intel Xeon Gold 5218	None
apollo4oil2	trixie64nfs	69.82	3	32	188	3900	0	Intel Xeon Gold 5218	None

Avantages & inconvénients de l'immersion

- Constats d'exploitation après 4 ans :
 - Réduction de consommation « directe » de 10 % à 20 %
 - Température de l'huile jusqu'à 50°C à 55°C sans pertes de performance
 - Bonne tenue des équipements (un taux de panne comparable)
- Avantages :
 - Refroidissement de tous les composants sans distinction (barrettes de RAM, NVMe, ...)
 - Adaptation possible de l'existant ou exploitation de « matériel générique »
 - Exploitation de la chaleur fatale plus facile (eau à 50°C via l'échangeur)
 - Exploitation d'huile « bio-sourcée » (huile de friture désoxygénée)
- Inconvénients :
 - En plus des « risques » électriques, des « risques » chimiques
 - Raidissement des câbles électriques (intérieurs aux équipements ou extérieurs)
 - Frilosité des intégrateurs depuis quelques années & « marchands du temple » se goinfrant !