
Sujet : Placement et consolidation de machines virtuelles dans le *cloud*

Il est rappelé que le jury attend un exposé de 35 minutes, pédagogique et structuré, fondé sur ce sujet. Ce texte se conclut par une liste de pistes de réflexion pour guider la conception de l'exposé, mais toute initiative personnelle pertinente est appréciée. L'exposé doit contenir une ou plusieurs illustrations informatiques, ainsi qu'une discussion portant sur une dimension éthique, sociétale, environnementale, économique ou juridique. Une piste particulière est proposée à cet effet.

1 Introduction

Le *cloud computing* (aussi appelé « informatique en nuage ») s'est imposé comme une pierre angulaire de notre société, en soutenant la gestion de la grande majorité des applications que nous utilisons au quotidien. Qu'il s'agisse d'applications web ou mobiles, ou de clients lourds s'exécutant sur les ordinateurs personnels des usagers finaux, des services logiciels hébergés dans ce *cloud* sont certainement sollicités pour répondre à leurs besoins.

L'offre de service la plus répandue dans ce domaine est l'IaaS (pour *Infrastructure-as-a-Service* en anglais, « infrastructure en tant que service » en français). Une offre IaaS prend généralement la forme d'un site Internet qui permet aux clients d'un fournisseur *cloud* de configurer et de déployer une machine virtuelle (VM pour *virtual machine* en anglais) lorsqu'ils en ont besoin. Les offres IaaS les plus connues sont Amazon Web Services et Microsoft Azure. Ces fournisseurs IaaS se chargent alors de mettre à disposition de leurs clients la ou les machines virtuelles demandées dans les plus brefs délais. Ceux-ci peuvent alors les utiliser aussi longtemps qu'ils le souhaitent, moyennant un paiement périodique indexé sur la quantité de ressources matérielles mobilisées. Les clients peuvent arrêter et décommissionner à tout moment les machines virtuelles qu'ils exploitent, remettant ainsi les ressources matérielles à la disposition du fournisseur IaaS.

La rapidité et la flexibilité de l'offre IaaS sont plébiscitées par les clients, ce qui incite les fournisseurs d'infrastructures à construire de nouveaux centres de données (en anglais, *data centers*) pour répondre à ces demandes.

Dans ce sujet, nous étudions la manière dont les ressources des machines physiques hébergées par un centre de données sont utilisées dans le cadre d'une offre IaaS. Nous allons notamment voir les difficultés posées par l'émergence de ce modèle, à la fois facile d'accès pour ses utilisateurs finaux et relativement complexe à gérer pour ses opérateurs.

2 Placement des machines virtuelles dans une infrastructure de *cloud computing*

Le succès du *cloud computing* résulte de la combinaison de multiples technologies qui ont permis aux fournisseurs IaaS de mettre à disposition des usagers des machines virtuelles à la demande. Parmi ces technologies exploitées par les fournisseurs, le développement des hyperviseurs a permis d'introduire la notion de virtualisation des ressources et d'ajuster la quantité de mémoire (RAM) et de CPU allouée à chaque machine virtuelle, respectivement dénommées vRAM et vCPU. En s'affranchissant des contraintes imposées par les composants matériels (processeurs et barrettes de mémoire), la virtualisation a permis de proposer des machines virtuelles offrant des ratios vCPU:vRAM mieux ajustés aux besoins des applications hébergées (cf. Table 1).

Ressources	Unités	A	B
vCPU	cœurs	4	2
vRAM	Go	2	4

TABLE 1 – Exemples de ressources vCPU et vRAM allouables à des machines virtuelles de type A et B qu'un fournisseur IaaS peut déployer.

2.1 Modèle de déploiement des machines virtuelles

Si une même machine physique peut ainsi faire cohabiter plusieurs machines virtuelles, le rôle des fournisseurs IaaS consiste à placer intelligemment ces machines virtuelles au sein d'un parc de machines physiques. La principale difficulté pour ces fournisseurs provient du caractère imprévisible des requêtes de déploiement de nouvelles machines virtuelles auxquelles il faut pouvoir répondre le plus rapidement possible. De même, l'arrêt d'une machine virtuelle et son décommissionnement ne peuvent pas être anticipés par les fournisseurs car ils sont généralement initiés manuellement par les clients.

Le chronogramme de la figure 1 illustre une séquence de requêtes de déploiement et de décommissionnement de 7 machines virtuelles de types A et B reçues par un fournisseur IaaS sur une période donnée. Dans cette figure, la longueur de la flèche représente la durée de vie de chaque machine virtuelle, tandis que la couleur indique le type de machine virtuelle déployée.

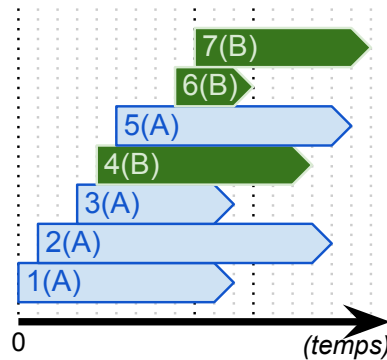


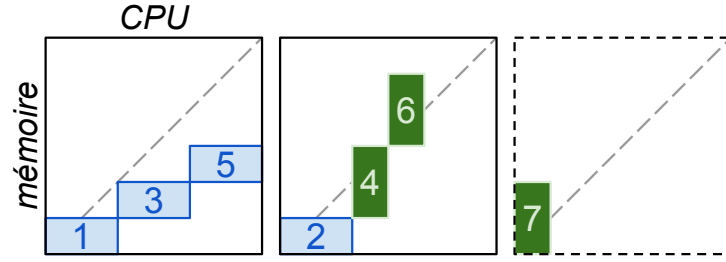
FIGURE 1 – Chronogramme des requêtes d'allocation et de décommissionnement de machines virtuelles des types A et B.

2.2 Stratégies de placement des machines virtuelles

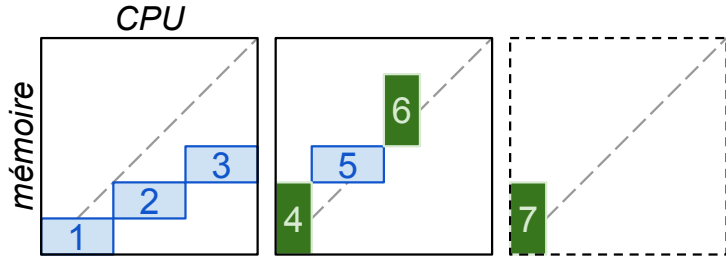
Les fournisseurs IaaS traitent ces demandes de déploiement de machines virtuelles en appliquant une stratégie de placement. Une stratégie de placement des machines virtuelles associe, pour chaque demande de déploiement d'une machine virtuelle, la machine physique cible où la placer.

Il existe notamment deux stratégies de l'état de l'art, connues sous les noms de *spread* et *binpack*, qui proposent des heuristiques simples pour associer des machines virtuelles à des machines physiques, comme l'illustre la figure 2. Dans cette figure, chaque carré noir représente une machine physique. La hauteur de ce carré correspond à la quantité de mémoire disponible, tandis que sa largeur indique le nombre de cœurs disponibles pour héberger des machines virtuelles. La stratégie *spread* vise à répartir le déploiement des machines virtuelles sur un ensemble de machines physiques disponibles, tandis que la stratégie *binpack* vise à mobiliser un maximum de ressources sur une machine physique avant d'en solliciter une nouvelle.

Dans cet exemple, les 7 machines virtuelles du chronogramme de la figure 1 doivent être déployées sur 2 machines physiques initialement disponibles. Cependant, peu importe la stratégie de placement considérée, nous pouvons notamment constater, dans cet exemple, que (i) il est nécessaire de faire appel à une troisième machine physique pour allouer la septième machine virtuelle, alors que (ii) la première machine physique dispose encore de mémoire non allouée et la deuxième de CPU non alloués.



(a) Stratégie de placement *spread*.



(b) Stratégie de placement *binpack*.

FIGURE 2 – Stratégies standards de placement des machines virtuelles sur des machines physiques

Or, en adoptant une stratégie de placement plus intelligente, qui tient mieux compte du ratio CPU:RAM de la machine physique (illustré par la diagonale en pointillés), il est possible de n'utiliser que 2 machines physiques pour héberger les 7 machines virtuelles, comme illustré dans la figure 3.

Les stratégies de placement des machines virtuelles permettent donc de répondre aux demandes de déploiement de nouvelles machines virtuelles, quelle que soit leur durée de vie, afin que le fournisseur IaaS puisse s'assurer que toutes les machines virtuelles hébergées dans le *cloud* disposent de ressources matérielles suffisantes pour satisfaire les besoins des applications finales.

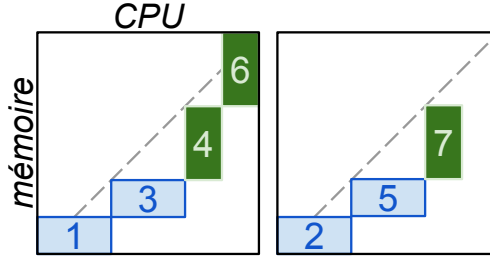


FIGURE 3 – Stratégie intelligente de placement des machines virtuelles d'un fournisseur IaaS.

3 Consolidation des machines virtuelles dans une infrastructure de *cloud computing*

Au-delà du placement initial des machines virtuelles sur les machines physiques, l'imprévisibilité de leur cycle de vie peut entraîner une utilisation inefficace de l'infrastructure *cloud*, comme l'illustre la figure 4. Par exemple, une fois que les clients ont décidé de décommissionner les machines virtuelles 1, 3 et 6, nous constatons que, peu importe la stratégie de placement adoptée, les machines physiques mobilisées peuvent rester sous-utilisées pendant une période potentiellement prolongée si aucune nouvelle machine virtuelle n'est à déployer.

3.1 Procédure de consolidation des machines virtuelles

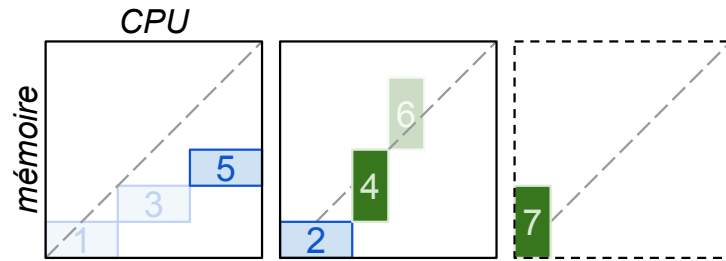
Pour pallier cette inefficacité, les fournisseurs IaaS déclenchent une procédure de consolidation de leurs machines physiques afin de regrouper les machines virtuelles sur un nombre plus restreint de machines physiques, comme illustré dans la figure 5.

À la différence de la procédure de placement des nouvelles machines virtuelles, qui s'opère au fil de la réception des requêtes de déploiement, la procédure de consolidation s'appuie sur un ensemble de machines virtuelles déjà déployées. Si ce problème est considéré comme NP-complet par réduction depuis *bin packing*, il peut tout à fait être formalisé par programmation linéaire en nombres entiers comme décrit ci-après. Soient :

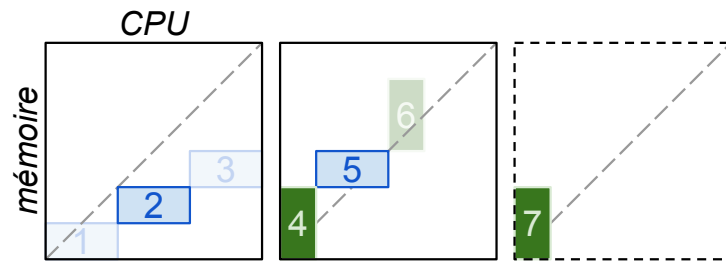
- $\mathcal{V} = \{1, \dots, n\}$ l'ensemble des machines virtuelles (VMs) déployées,
- $\mathcal{P} = \{1, \dots, m\}$ l'ensemble des machines physiques (PMs) disponibles,
- $c_j^{\text{cpu}}, c_j^{\text{mem}} \in \mathbb{R}^+$ la capacité CPU et mémoire de la PM $j \in \mathcal{P}$,
- $r_i^{\text{cpu}}, r_i^{\text{mem}} \in \mathbb{R}^+$ la demande en CPU et en mémoire de la machine virtuelle $i \in \mathcal{V}$.

Les variables de décision considérées dans ce cadre peuvent être définies comme :

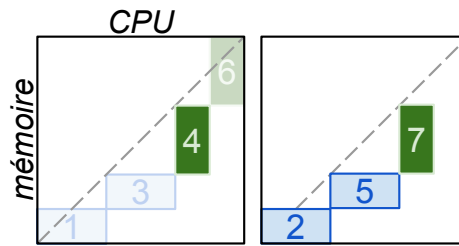
$$\begin{aligned}
 x_{ij} &\in \{0, 1\}, \quad i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{P} && (x_{ij} = 1 \text{ si la machine virtuelle } i \text{ est placée sur la PM } j) \\
 y_j &\in \{0, 1\}, \quad j \in \mathcal{P} && (y_j = 1 \text{ si la PM } j \text{ est utilisée, telle que } y_j = 1 - \prod_{i \in \mathcal{V}} (1 - x_{ij}))
 \end{aligned}$$



(a) Machines virtuelles placées par la stratégie *spread*.



(b) Machines virtuelles placées par la stratégie *binpack*.



(c) Machines virtuelles placées par la stratégie intelligente.

FIGURE 4 – Évolution de l'allocation des ressources selon le chronogramme de la figure 1 (état de déploiement après le décommissionnement de la sixième machine virtuelle).

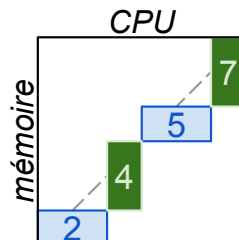


FIGURE 5 – Déploiement consolidé des machines virtuelles sur une seule machine physique.

Ce qui nous permet de formuler le problème de consolidation des machines virtuelles de la manière suivante :

$$\text{minimiser} \quad \sum_{j \in \mathcal{P}} y_j \quad (1)$$

$$\text{sous les conditions} \quad \sum_{j \in \mathcal{P}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} r_i^{\text{cpu}} x_{ij} \leq c_j^{\text{cpu}} y_j, \quad \forall j \in \mathcal{P} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} r_i^{\text{mem}} x_{ij} \leq c_j^{\text{mem}} y_j, \quad \forall j \in \mathcal{P} \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \forall j \in \mathcal{P} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \forall j \in \mathcal{P} \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \mathcal{P} \quad (7)$$

La résolution du problème permet alors d'obtenir un nouveau placement des machines virtuelles actives sur un nombre réduit de machines physiques (comme celui présenté dans la figure 5).

3.2 Coût de la migration des machines virtuelles

Pour mettre en œuvre ce nouveau placement et migrer les machines virtuelles vers les machines physiques cibles, les fournisseurs IaaS déclenchent des actions de reconfiguration qui consistent à effectuer une sauvegarde de l'état de la machine virtuelle, à l'arrêter, à décommissionner les ressources physiques associées à la machine virtuelle, à migrer la sauvegarde vers la machine cible, puis à la restaurer et à la démarrer. Le temps d'indisponibilité des machines virtuelles dépend alors de la rapidité avec laquelle ces opérations peuvent être orchestrées. Cependant, ce temps d'indisponibilité peut augmenter à mesure que le nombre de machines virtuelles à déplacer via le réseau augmente.

Pour minimiser cet impact en production, il est possible de modifier la formulation du problème initial afin d'ajouter une nouvelle contrainte limitant le nombre de migrations. Alternativement, il est également possible de conserver les machines physiques les plus utilisées pour héberger les machines virtuelles du plan de déploiement consolidé et, le cas échéant, de permuter les machines virtuelles de type équivalent afin de minimiser les migrations inutiles.

4 Allocation des ressources des machines physiques d'une infrastructure de *cloud computing*

4.1 Surallocation des ressources des machines physiques

Dans certaines situations, il manque peu de ressources CPU et/ou de mémoire sur les machines physiques pour placer ou consolider les machines virtuelles sur un nombre réduit de machines physiques. Dans ce cas, les fournisseurs IaaS peuvent mettre en place une surallocation de ressources physiques en acceptant que le nombre de ressources allouées aux machines virtuelles dépasse la quantité de ressources physiques disponibles (par exemple, un fournisseur peut accepter l'allocation de 2 vCPU pour chaque cœur et 1,5 Go de vRAM par Go de mémoire vive de la machine physique).

4.2 Épinglage des ressources des machines physiques

Pour s'assurer que les machines virtuelles ne se concurrencent pas pour l'accès aux ressources de calcul, il est possible d'épingler les vCPU d'une machine virtuelle aux cœurs de la machine physique sur laquelle elle est hébergée, tout comme de contraindre la quantité de mémoire physique qui lui est allouée. Le système d'exploitation Linux propose cette fonctionnalité via les groupes de contrôle (*cgroups*) qui permettent d'isoler les machines virtuelles en contraignant l'affectation des processus par l'ordonnanceur de la machine physique et en imposant une limite de mémoire à ne pas dépasser.

Dans le contexte d'un fournisseur IaaS, il peut donc être pertinent de tirer parti de la topologie de la machine physique (cf. figure 6) pour répartir les machines virtuelles sur l'ensemble de ses cœurs. Dans cet exemple, nous observons notamment que les cœurs sont organisés en paires de cœurs virtuels (*hyperthreads*) qui partagent deux caches de premier niveau (pour les données et les instructions) ainsi qu'un cache de deuxième niveau. Le troisième niveau de cache est, quant à lui, partagé entre tous les cœurs. La topologie des machines physiques étant connue des fournisseurs IaaS, il leur est donc possible de guider l'allocation des ressources afin de maximiser les performances des machines virtuelles et de limiter les effets de bord de leur activité sur les autres machines virtuelles.

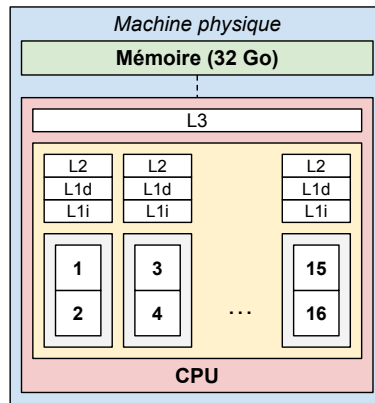


FIGURE 6 – Topologie de l'architecture matérielle d'une machine physique disposant de 16 cœurs et de 32 Go de mémoire vive.

Le fournisseur IaaS peut, par exemple, disposer d'un script `epingle_vm.sh` sur chaque machine physique, prenant en paramètre le PID du processus de la VM à épingler, une liste d'identifiants de cœurs et une quantité de mémoire. Grâce à un tel script, il est possible d'exécuter la commande `./epingle_vm.sh 123 1,2 4` pour créer un groupe de contrôle dédié au processus 123, qui alloue, pendant toute sa durée d'exécution, 2 cœurs physiques et contraint l'allocation d'au plus 4 Go de mémoire vive.

Cette technique d'allocation bi-niveau des ressources permet ainsi de définir des zones d'allocation du CPU et de la mémoire d'une machine physique, tout en laissant ensuite la liberté à l'ordonnanceur d'exécuter les tâches sur le sous-ensemble de CPU et de mémoire, selon sa propre stratégie.

5 Conclusion

Les solutions IaaS étant continuellement sollicitées, les procédures de placement et de consolidation doivent en réalité coexister afin de gérer l'infrastructure de la manière la plus efficace

possible. Il est donc crucial pour les fournisseurs d'IaaS d'identifier un équilibre entre les phases de placement et de consolidation afin d'exploiter au mieux leurs machines physiques.

Par ailleurs, les contraintes d'allocation des ressources physiques ne sont pas nécessairement les seules dont un fournisseur IaaS doit tenir compte. En particulier, des problématiques de sécurité peuvent s'avérer importantes, qu'il s'agisse de la colocalisation de machines virtuelles ou non sur une machine physique. Enfin, il est également nécessaire qu'une infrastructure *cloud* dispose toujours d'une réserve suffisante de ressources physiques pour pallier des pannes (de machines physiques, d'équipements réseau, de centres de données) ou des pics d'activité inattendus (en anglais, *cloud bursting*).

Pistes de réflexion pour l'exposé

1. Proposer une illustration graphique de l'évolution de la disponibilité des ressources CPU et de mémoire des machines physiques pour le placement des 7 machines virtuelles de la figure 1, en fonction des stratégies de placement considérées (cf. figures 2 et 3).
2. Écrire l'algorithme et les tests unitaires pertinents de la stratégie intelligente de placement des machines virtuelles présentée dans la figure 3.
3. Discuter quand il semble opportun de déclencher une procédure de consolidation des machines virtuelles, puis réviser la formulation du problème de consolidation afin d'introduire une contrainte limitant le nombre de déplacements des machines virtuelles au cours de la phase de consolidation.
4. Commenter si l'ordre d'exécution des actions de mise en œuvre du plan de placement effectif des machines virtuelles est important ou non. Les propos peuvent être illustrés par les actions nécessaires pour passer de la situation décrite dans la figure 4a à celle de la figure 5.
5. Commenter pourquoi le nombre de machines virtuelles déplacées peut affecter le temps d'indisponibilité de ces machines. Discuter de la topologie du réseau reliant les machines physiques et de l'intérêt de la prendre en compte dans les stratégies de placement et de consolidation.
6. Étant donné un placement consolidé, développer une heuristique pour associer les machines physiques disponibles au nouveau placement des machines virtuelles.
7. Réviser la formulation des problèmes de placement et de consolidation des machines virtuelles afin d'introduire une surallocation des ressources matérielles (CPU et mémoire).
8. Développer un simulateur permettant d'illustrer l'allocation des cœurs et de la mémoire vive d'une machine physique, en simulant l'exécution du script `epingle_vm.sh` afin d'isoler les machines virtuelles déployées sur cette machine physique simulée. Ce simulateur peut être utilisé pour illustrer l'épinglage des machines virtuelles de la figure 5 aux ressources de la machine physique, comme le montre la figure 6. Discuter des avantages et des inconvénients de la mise en place de l'épinglage des ressources physiques dans le contexte d'un fournisseur IaaS.
9. Discuter de la nature des impacts environnementaux des centres de données qui hébergent ces machines physiques. Quels autres enjeux poussent les fournisseurs *cloud* à minimiser le nombre de machines physiques dans leur offre IaaS ?
10. Analyser les risques liés au cohébergement des machines virtuelles sur une machine physique.