



Conception d'infrastructures

Projet 1 : Virtualisation & Cloud

DOSSIER TECHNIQUE

CHEFFE DE PROJET : AMÉLIE

EQUIPE : SALMA, BENOÎT, CHRISTIAN, KHOUASSI, JEAN

GROUPE 2

EXPERT RÉSEAUX ET INFRASTRUCTURES SÉCURISÉES

2025 - 2026

Table des matières

1. OBJECTIF DU PROJET	3
1.1 Objectifs généraux	3
1.2 Objectifs techniques spécifiques	4
2. CONTEXTE ET ENJEUX	5
2.1 Contexte organisationnel	5
2.2 Enjeux stratégiques	5
2.3 Contraintes identifiées	5
3. SOLUTIONS ENVISAGÉES	6
3.1 Solution 1 : Cloud Privé (Infrastructure On-Premise)	6
3.1 Solution 2 : Cloud Public	7
3.2 Solution 3 : Cloud Hybride	8
4. ÉTUDE COMPARATIVE DÉTAILLÉE	9
4.1 Tableau comparatif détaillé des trois solutions	9
4.2 Analyse financière détaillée	13
4.3 Matrice de risques	16
5. SOLUTION RETENUE : CLOUD HYBRIDE	17
5.1 Justification du choix	17
5.2 Cas d'Usage Idéal	18
5.2 Composants illustres	18
6. Mise en place des environnements technologiques	19
6.1 Architecture multi-systèmes	19
6.2 Configuration des systèmes d'exploitation	19
7. MAÎTRISE DE L'ADMINISTRATION	21
7.1 Gestion des comptes utilisateurs	21
7.2 Administration des ressources	22
8. PROCÉDURE DE MISE EN ŒUVRE	23
8.1 Phase 1 : Préparation de l'Infrastructure (Jours 1-2)	23
8.2 Phase 2 : Mise en Place du Cluster (Jours 3-4)	24
8.4 Phase 4 : Validation et Livraison (Jours 7-8)	26
9. Conclusion	27
10. Annexes	28

1. OBJECTIF DU PROJET

1.1 Objectifs généraux

Le CFA Numérique souhaite ouvrir une nouvelle formation à distance destinée à 15 demandeurs d'emploi, débutant en décembre 2025 et se terminant en juillet 2026. Cette formation doit permettre aux stagiaires de réaliser des travaux pratiques et des projets dans de bonnes conditions. Pour cela, il est essentiel de mettre en place un environnement technologique adapté. Les enjeux principaux de ce projet sont :

- **Accessibilité universelle** : Garantir l'accès aux ressources depuis n'importe quel lieu et appareil.
- **Performance pédagogique** : Assurer une qualité de formation équivalente au présentiel.
- **Sécurité des données** : Conformité RGPD et protection des données sensibles.
- **Collaboration** : Faciliter la communication et la collaboration entre les stagiaires et les formateurs.
- **Continuité de service** : Disponibilité 99.5% minimum avec solution de reprise d'activité.
- **Soutien technique** : Mettre en place un support technique réactif pour résoudre rapidement les problèmes éventuels rencontrés par les stagiaires.
- **Maîtrise des coûts** : Optimisation financière sur 7 mois avec évolutivité.

1.2 Objectifs techniques spécifiques

Pour répondre aux enjeux identifiés, les objectifs suivants ont été définis :

- **Mettre en place une plateforme de formation en ligne** : Choisir et déployer une solution technologique permettant de gérer les cours, les travaux pratiques et les projets des stagiaires.
- **Assurer la communication et la collaboration** : Utiliser la suite Office 365 avec Microsoft Teams pour organiser des réunions régulières et faciliter les échanges entre les stagiaires et les formateurs.
- **Planifier et organiser les activités** : Utiliser soit Planner de Microsoft ou Trello pour planifier les différentes étapes de la formation, suivre l'avancement des travaux et organiser les tâches.
- **Partager les fichiers et les ressources** : Utiliser soit Drive de Microsoft soit Trello pour partager les documents, les supports de cours et les ressources nécessaires à la formation.
- **Former les utilisateurs** : Organiser des sessions de formation pour les stagiaires et les formateurs afin de les familiariser avec les outils et les plateformes utilisés.
- **Évaluer et améliorer** : Mettre en place des mécanismes d'évaluation continue pour recueillir les retours des stagiaires et améliorer constamment la qualité de la formation.
- **Gestion de projet** : Utiliser ODOO ÉDUCATION pour faciliter la gestion des projets.

2. CONTEXTE ET ENJEUX

2.1 Contexte organisationnel

Le CFA Numérique, structure de 100 salariés accueillant 1000 apprenants annuels, lance une nouvelle formation destinée aux demandeurs d'emploi :

- **Durée** : 7 mois (décembre 2025 - juillet 2026).
- **Public** : 15 stagiaires + 1 formateur.
- **Format** : 100% à distance.
- **Spécialité** : Informatique avec travaux pratiques intensifs.

2.2 Enjeux stratégiques

- **Démocratisation** : Élargir l'accès à la formation sans contrainte géographique.
- **Innovation pédagogique** : Moderniser les méthodes d'enseignement.
- **Compétitivité** : Positionner le CFA sur le marché de la formation digitale.
- **Durabilité** : Créer un modèle réutilisable pour d'autres formations.

2.3 Contraintes identifiées

- Budget limité avec nécessité de justifier le ROI.
- Hétérogénéité des équipements stagiaires.
- Respect des délais (démarrage décembre 2025).
- Conformité réglementaire (RGPD, accessibilité).

3. SOLUTIONS ENVISAGÉES

Face aux besoins spécifiques de formation à distance pour 15 demandeurs d'emploi en informatique, trois approches technologiques principales ont été étudiées. Chaque solution répond différemment aux enjeux d'accessibilité, de pédagogie technique et de maîtrise des coûts.

3.1 Solution 1 : Cloud Privé (Infrastructure On-Premise)

Architecture : Infrastructure 100% locale basée sur Proxmox VE

Composants techniques :

- Serveur physique : Dell PowerEdge R740 (2x Intel Xeon Silver, 128 Go RAM, 4 To SSD).
- Hyperviseur : Proxmox VE 8.0.
- Accès distant : Apache Guacamole.
- Stockage : ZFS RAID-Z2.
- Authentification : LDAP local.
- Sauvegarde : Scripts personnalisés + stockage externe.

Avantages :

- Souveraineté totale des données.
- Contrôle maximal de l'infrastructure.
- Coûts prévisibles (CapEx uniquement).
- Performance réseau optimale.
- Personnalisation illimitée.

Inconvénients :

- Absence de MFA native.
- Maintenance entièrement à la charge du CFA.
- Évolutivité limitée par le matériel.
- Risque de panne unique (SPOF).
- Sauvegarde manuelle.

3.1 Solution 2 : Cloud Public

Architecture : Infrastructure 100% cloud (AWS, Azure ou GCP).

Composants techniques :

- Services évalués : AWS WorkSpaces, Azure Virtual Desktop, Google Cloud VDI.
- Instance type : 2 vCPU, 8 Go RAM par utilisateur.
- Stockage : Services cloud natifs.
- Authentification : SSO intégré + MFA.
- Sauvegarde : Automatique et géo-répliquée.

Avantages :

- Déploiement rapide (2-3 semaines).
- Scalabilité illimitée.
- Haute disponibilité intégrée.
- Sécurité entreprise (certifications SOC2, ISO 27001).
- Maintenance gérée par le fournisseur.

Inconvénients :

- Coûts OpEx élevés et récurrents.
- Dépendance totale au fournisseur.
- Contrôle limité sur l'infrastructure.
- Facturation à l'usage imprévisible.
- Hébergement des données chez un tiers.

3.2 Solution 3 : Cloud Hybride

Architecture : Proxmox local + Services Azure AD.

Composants techniques :

- Infrastructure locale : Serveur Proxmox VE.
- Authentification : Azure Active Directory + MFA.
- Accès distant : Apache Guacamole + Reverse Proxy NGINX.
- Sauvegarde hybride : Locale + Azure Blob Storage.
- Monitoring : Prometheus + Grafana + Azure Monitor.

Avantages :

- Équilibre coût/sécurité optimal.
- Authentification moderne avec MFA.
- Hébergement local des données sensibles.
- Sauvegarde cloud sécurisée.
- Évolutivité maîtrisée.
- Pertinence pédagogique (on-premise + cloud).

Inconvénients :

- Complexité d'intégration initiale.
- Formation équipe requise.
- Dépendance partielle à Azure.
- Configuration plus longue.

4. ÉTUDE COMPARATIVE DÉTAILLÉE

4.1 Tableau comparatif détaillé des trois solutions

CRITÈRES	SOLUTION 1 : CLOUD PRIVÉ	SOLUTION 2 : CLOUD PUBLIC	SOLUTION 3 : CLOUD HYBRIDE
DESCRIPTION	Infrastructure 100% locale basée sur Proxmox	Infrastructure 100% cloud (AWS/Azure/GCP)	Proxmox local + Services Azure
MODÈLE FINANCIER	CapEx uniquement	OpEx récurrent	CapEx + OpEx

COMPOSANTS TECHNIQUES

CRITÈRES	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Infrastructure	Serveur Proxmox local	VMs cloud managées	Serveur Proxmox local
Accès distant	Guacamole local	Client natif cloud	Guacamole + Azure AD
Authentification	Locale (pas de MFA)	SSO cloud natif	Azure AD + MFA
Stockage	Disques locaux	Stockage cloud	Disques locaux
Sauvegarde	Manuelle locale	Automatique cloud	Locale (extensible cloud)

AVANTAGES

CRITÈRES	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Performance	Réseau local optimal	Accès optimisé par provider	Réseau local optimal
Contrôle	Total sur l'infrastructure	Interface de gestion centralisée	Maîtrise infrastructure

Données	Souveraineté totale	Haute disponibilité intégrée	Hébergement local
Sécurité	Isolation réseau	Normes entreprise (SOC, ISO)	Authentification moderne
Déploiement	Configuration sur mesure	Rapide (quelques jours)	Flexibilité hybride
Maintenance	Contrôle total	Gérée par le provider	Maintenance allégée
Évolutivité	Personnalisation maximale	Scalabilité illimitée	Évolution maîtrisée

INCONVÉNIENTS

CRITÈRES	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Sécurité	Pas de MFA natif	Dépendance fournisseur	Dépendance partielle Azure
Coût	Maintenance interne	Facture élevée récurrente	Investissement initial
Complexité	Installation complexe	Configuration spécialisée	Intégration plus complexe
Maintenance	Entièrement à charge CFA	Moins de contrôle direct	Formation équipe requise
Données	Sauvegarde manuelle	Hébergées chez tiers	Backup hybride à organiser
Dépendance	Internet CFA critique	Totale au fournisseur	Partielle aux services cloud

SÉCURITÉ

CRITÈRES	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Authentification	Basique (login/mot de passe)	SSO + MFA natif	Azure AD + MFA
Accès	VPN ou exposition directe	Sécurisé par design	Reverse proxy + Azure AD
Données	Isolées réseau local	Chiffrées, certifiées	Locales + authentification cloud
Conformité	RGPD manuel	Certifications multiples	RGPD local + Azure compliance

MISE EN ŒUVRE

CRITÈRES	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Durée	6-8 semaines	2-3 semaines	8-10 semaines
Effort	Élevé	Faible à Modéré	Modéré à Élevé
Expertise requise	Admin système + réseau	Config cloud + portail web	Admin système + Azure
Risque technique	Moyen (matériel, config)	Faible (infrastructure gérée)	Moyen (intégration)

ÉVOLUTIVITÉ

CRITÈRES	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Ajout utilisateurs	Limité par serveur physique	Instantané via portail	Limité par serveur
Nouvelles fonctionnalités	Développement manuel	Activé par abonnement	Hybride (local + cloud)
Montée en charge	Investissement matériel	Automatique	Planifiée

SCÉNARIO IDÉAL

CRITÈRES	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Profil organisation	CFA avec forte expertise technique, budget CapEx limité, exigence souveraineté totale	Organisation sans contrainte budgétaire, besoin de déploiement rapide à grande échelle	CFA recherchant équilibre coût/sécurité/modernité

4.2 Analyse financière détaillée

Tableau comparatif des coûts (7 mois - 15 stagiaires + 1 formateur)

CRITÈRE FINANCIER	SOLUTION 1 : CLOUD PRIVÉ	SOLUTION 2 : CLOUD PUBLIC	SOLUTION 3 : CLOUD HYBRIDE
COÛT TOTAL	1 800€ - 2 200€	8 500€ - 16 000€	2 907€
MODÈLE	100% CapEx	100% OpEx	76% CapEx + 24% OpEx

DÉTAIL CAPEX

POSTE	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Serveur physique	1 500€ - 1 800€	0€	1 800€
Équipements réseau	200€ - 300€	0€	350€
Logiciels	0€ (open source)	0€	0€
Sous-total CapEx	1 700€ - 2 100€	0€	2 150€

DÉTAIL OPEX (7 mois)

POSTE	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Électricité/climatisation	100€ - 200€	0€	150€
Services cloud	0€	Voir détail ci-dessous	672€ (Azure AD)
Maintenance/support	0€ (interne)	Inclus	35€ (monitoring)
Sous-total OpEx	100€ - 200€	8 500€ - 16 000€	857€

COÛT PAR STAGIAIRE

MÉTRIQUE	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Sur 7 mois	120€ - 147€	567€ - 1 067€	194€
Par mois	17€ - 21€	81€ - 152€	28€

Détail des coûts Cloud Public par fournisseur

FOURNISSEUR	SERVICE	CONFIG VM	PRIX/VM/MOIS	15 VMS × 7 MOIS	TOTAL ESTIMÉ
AWS	WorkSpaces	t3.large (2vCPU, 8GB)	145€	15 225€	> 16 000€
Microsoft	Azure Virtual Desktop	D2as v4 (2vCPU, 8GB)	100€	10 500€	> 11 500€
Google	Compute Engine + VDI	e2-standard-2 + Windows	75€	7 875€	> 8 500€

Note : Prix hors formateur, stockage additionnel, bande passante sortante et support premium

Impact de la durée sur la rentabilité

HORIZON	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE	SOLUTION OPTIMALE
7 mois (Notre projet)	2 200€	8 500€ - 16 000€	2 907€	Cloud Hybride
3 ans (Projection)	6 500€*	44 000€ - 82 000€	8 200€	Cloud Hybride

Coûts incluant renouvellement matériel, maintenance et mise à jour sécurité

Analyse comparative détaillée

SCÉNARIO	ANALYSE	RECOMMANDATION
7 MOIS	<ul style="list-style-type: none"> • Cloud Privé : Économique mais sécurité basique • Cloud Public : 3-5x plus cher, impossible à justifier • Cloud Hybride : +32% vs privé pour une sécurité moderne 	CHOIX OPTIMAL : Cloud Hybride
3 ANS	<ul style="list-style-type: none"> • Cloud Privé : TCO dégradé (maintenance, obsolescence, pannes) • Cloud Public : Coût toujours prohibitif (5-10x plus cher) • Cloud Hybride : Reste optimal, amortit mieux l'investissement Azure 	TOUJOURS GAGNANT : Cloud Hybride

Synthèse économique - Focus 7 mois vs 3 ans

MÉTRIQUE	7 MOIS	3 ANS
Solution optimale	Cloud Hybride (2 907€)	Cloud Hybride (8 200€)
Économies vs Cloud Public	66% - 82%	81% - 90%
Justification du choix	Sécurité moderne à coût maîtrisé	Amortissement optimal + évolutivité

Conclusion : Le Cloud Hybride reste la solution optimale sur les deux horizons temporels.

4.3 Matrice de risques

RISQUE	CLOUD PRIVÉ	CLOUD PUBLIC	CLOUD HYBRIDE
Panne matériel	Élevé	Faible	Modéré
Dépassement budget	Faible	Élevé	Faible
Faible sécurité	Modéré	Faible	Faible
Indisponibilité service	Modéré	Faible	Modéré
Dépendance fournisseur	Nulle	Élevé	Modéré

5. SOLUTION RETENUE : CLOUD HYBRIDE

Notre décision est d'opter pour une architecture hybride innovante afin de soutenir la nouvelle formation du CFA Numérique. Après une analyse rigoureuse, la solution choisie combine la flexibilité et la maîtrise de Proxmox, tout en les intégrant stratégiquement au sein de l'environnement Microsoft Azure.

Cette approche nous permettra de tirer parti des avantages de la virtualisation locale pour des besoins spécifiques, tout en exploitant la scalabilité, la sécurité et les services avancés d'Azure pour l'hébergement et la gestion de notre infrastructure. Cette solution hybride garantira un environnement technologique performant, sécurisé et parfaitement adapté aux exigences de nos stagiaires, tout en optimisant nos ressources.

5.1 Justification du choix

La solution Cloud Hybride s'impose comme le choix optimal pour le CFA Numérique en raison de :

Critères économiques :

- Coût maîtrisé : 2 907€ pour 7 mois (vs 16 000€ cloud public).
- ROI excellent : 28€/stagiaire/mois.
- Modèle financier équilibré : 76% CapEx + 24% OpEx.

Critères techniques :

- Sécurité moderne : Azure AD + MFA.
- Performance : Latence optimisée par hébergement local.
- Fiabilité : Double niveau de sauvegarde.
- Évolutivité : Extensible selon les besoins.

Critères pédagogiques :

- Expérience hybride : On-premise + Cloud.
- Réalisme professionnel : Environnement mixte.
- Flexibilité : Adaptation aux différents profils d'apprentissage

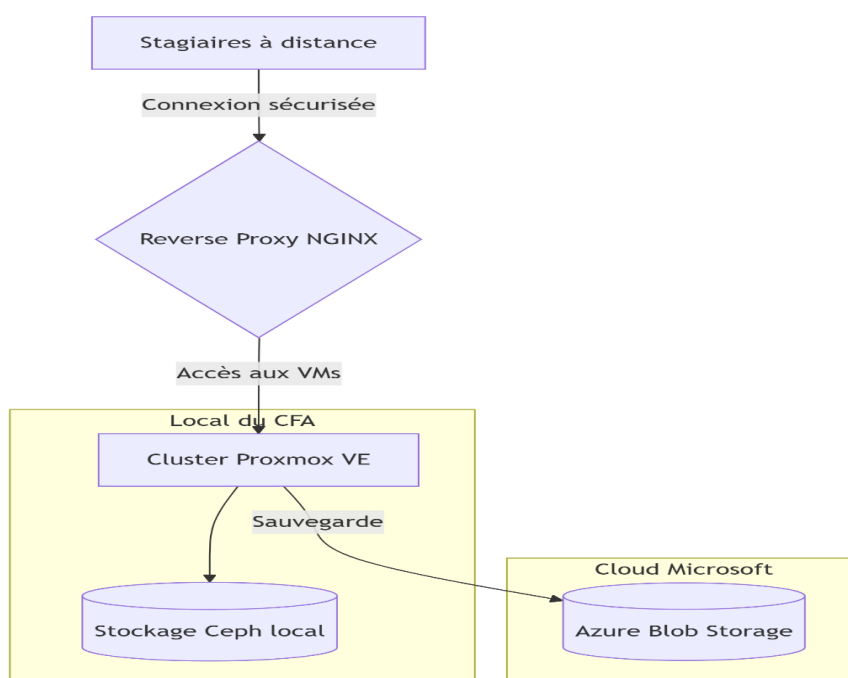
5.2 Cas d'Usage Idéal

➤ Formation hybride :

- Machines de développement/test en local (Proxmox).
- Environnements temporaires ou de démonstration sur Azure.

➤ Reprise d'activité (PRA) :

- Sauvegarder les VMs Proxmox sur Azure Blob Storage.
- Basculer vers Azure en cas de panne du serveur local



5.2 Composants illustres

- **Reverse Proxy** : La « porte d'entrée » sécurisée qui filtre les connexions
- **Cluster Proxmox** : Les 3 serveurs travaillant ensemble
- **Ceph** : Le système de stockage redondant
- **Azure Blob** : La sauvegarde externe

Ce schéma montre comment :

- Les stagiaires se connectent depuis chez eux
- Le trafic passe par un point de contrôle (NGINX)
- Les ressources sont fournies par le cluster local
- Les données sont protégées par double stockage

6. Mise en place des environnements technologiques

6.1 Architecture multi-systèmes

L'environnement hybride intègre différents systèmes d'exploitation pour répondre aux besoins variés de formation :

Composant	Type	Système d'Exploitation	Fonctionnalité
Serveur Privé CFA	Cloud Privé	Windows Server 2022	Hébergement d'applications internes
Serveur Privé CFA	Cloud Privé	Ubuntu Server 22.04	Services de base de données et développement
Instance Azure	Cloud Public	Windows Server 2022	Développement d'applications et tests
Instance Azure	Cloud Public	Ubuntu Server 22.04	Environnements de formation et de tests
Infrastructure Support	Cloud Public	CentOS 8	Infrastructure de support et stockage

6.2 Configuration des systèmes d'exploitation

Windows Server 2022

Rôles : Active Directory, DHCP, DNS.

Configuration :

- Mise en place de l'Active Directory pour la gestion des utilisateurs et des groupes.
- Configuration des services DNS pour la résolution de noms.
- Mise en place de DHCP pour l'attribution dynamique des adresses IP.

Ubuntu Server 22.04

Rôles : Serveur Web, Base de données.

Configuration :

- Installation de Nginx pour le serveur Web.
- Installation de MySQL pour la gestion des bases de données.
- Configuration de la sécurité avec des pare-feu (UFW).

CentOS 8

Rôles : Support technique.

Configuration :

- Mise en place de systèmes de surveillance (Nagios).
- Configuration des sauvegardes automatiques.

7. MAÎTRISE DE L'ADMINISTRATION

7.1 Gestion des comptes utilisateurs

Rôle	Nombre d'utilisateurs	Droits d'accès
Directeur	1	Accès complet
Secrétaire	1	Accès aux documents administratifs
Comptable	1	Accès aux finances
Administratifs	5	Accès aux données scolaires
Responsables de filière	3	Accès aux ressources pédagogiques
Techniciens IT	3	Accès aux serveurs et réseaux
Formateurs	10	Accès aux ressources de formation
Stagiaires	15	Accès aux environnements de formation

7.2 Administration des ressources

Administration des ressources cloud

Ressource	Type	Localisation	Usage
Serveurs Virtuels	Cloud Privé	CFA Numérique	Applications internes
Bases de données	Cloud Privé	CFA Numérique	Stockage des données des apprenants
Conteneurs Docker	Cloud Public	Azure	Développement et tests
Stockage Blob	Cloud Public	Azure/AWS	Sauvegarde et archivage

Outils de gestion

- **Azure Active Directory** : Gestion des identités et des accès, synchronisation avec le Cloud Privé.
- **Proxmox VE** : Administration des machines virtuelles et des ressources de calcul.
- **Outils de monitoring** : Utilisation de Grafana et Prometheus pour suivre l'utilisation des ressources.

8. PROCÉDURE DE MISE EN ŒUVRE

Objectif Principal : Mettre en place une infrastructure de formation virtualisée, résiliente et sécurisée, garantissant une continuité de service maximale grâce à un cluster haute disponibilité et une authentification centralisée via Azure AD (Entra ID).

Portée : Cette procédure couvre l'installation, la configuration, la sécurisation et la validation de l'ensemble de la plateforme, depuis l'infrastructure physique jusqu'à la livraison des accès utilisateurs.

8.1 Phase 1 : Préparation de l'Infrastructure (Jours 1-2)

Objectif : Installer et configurer l'infrastructure matérielle de base et les prérequis logiciels.

Réf.	Tâche	Détails Techniques & Commandes Clés	Statut
1.1	Rackement et Câblage	Installation physique des 2 serveurs, de la baie de stockage, des pare-feux et switches. Câblage redondant (LACP/Multi-path) pour tous les équipements critiques.	<input type="checkbox"/>
1.2	Configuration Réseau	Création des VLANs sur les switches : Management (VLAN 10), Stockage (VLAN 20), VM (VLAN 30), Client (VLAN 40). Configuration des interfaces réseaux des serveurs (Bonding LACP). Configuration des pare-feux (règles inter-VLAN, NAT, pare-feu)	<input type="checkbox"/>
1.3	Configuration Stockage (SAN/NAS)	Création des LUNs ou volumes partagés (RAID 10 conseillé). Configuration des contrôleurs pour le multi-chemin (MPIO). Attribution des droits d'accès aux serveurs Proxmox.	<input type="checkbox"/>
1.4	Préparation Azure AD (Entra ID)	Création du tenant Azure AD si nécessaire. Création des groupes : Formateurs, Stagiaires. Création des 16 comptes utilisateurs et attribution aux groupes. Activation des Security Defaults (MFA obligatoire).	<input type="checkbox"/>

8.2 Phase 2 : Mise en Place du Cluster (Jours 3-4)

Objectif : Déployer et configurer le cœur virtualisé haute disponibilité.

Réf.	Tâche	Détails Techniques & Commandes Clés	Statut
2.1	Installation de Proxmox VE	Installation de Proxmox VE (v8.x) sur les deux serveurs. Configuration de l'adressage IP dans le VLAN Management.	<input type="checkbox"/>
2.2	Création du Cluster HA	Création du cluster sur le premier nœud : <code>pvecm create CLUSTER-NAME</code> . Ajout du second nœud : <code>pvecm add IP-NOEUD-1</code> . Configuration du QDevice pour le quorum.	<input type="checkbox"/>
2.3	Intégration du Stockage	Ajout du stockage partagé (iSCSI/LVM ou NFS) au cluster via l'interface Web de Proxmox. Vérification du multipath.	<input type="checkbox"/>
2.4	Création du Template « Golden Master »	Création d'une VM Windows 10/11 Enterprise. Installation de tous les logiciels (VSCode, Docker Desktop, Git, etc.). Exécution de <code>sysprep /generalize /oobe</code> et conversion en template.	<input type="checkbox"/>

8.3 Phase 3 : Déploiement des Services (Jours 5-6)

Objectif : Déployer les services d'accès et de sécurisation.

Réf.	Tâche	Détails Techniques & Commandes Clés	Statut
------	-------	-------------------------------------	--------

3.1	Déploiement des VMs Stagiaires	Clonage de 16 VMs à partir du template. Configuration des adresses IP statiques ou via DHCP réservé.	<input type="checkbox"/>
3.2	Déploiement de l'Infrastructure Guacamole	Déploiement de 2 VMs Ubuntu Server. Installation de Docker et Docker-Compose. Déploiement de Guacamole via un docker-compose.yml officiel. Configuration de la base de données MySQL (liaison au service Azure Database for MySQL recommandée).	<input type="checkbox"/>
3.3	Intégration Azure AD (SAML/OIDC)	Inscription d'une Application d'Entreprise dans Azure AD. Configuration des paramètres SAML (URLs de callback, Entity ID). Configuration de Guacamole pour utiliser Azure AD comme fournisseur d'identité.	<input type="checkbox"/>
3.4	Mise en place du Load Balancer	Déploiement de 2 VMs HAProxy/Keepalived. Configuration de HAProxy pour équilibrer la charge entre les deux instances Guacamole. Configuration de Keepalived pour l'adresse IP Virtuelle (VIP) flottante.	<input type="checkbox"/>

8.4 Phase 4 : Validation et Livraison (Jours 7-8)

Objectif : Tester la résilience de la plateforme et la livrer aux utilisateurs.

Réf.	Tâche	Détails Techniques & Commandes Clés	Statut
4.1	Tests de Haute Disponibilité	Test 1 : Extinction d'un nœud Proxmox → Les VMs doivent migrer automatiquement. Test 2 : Arrêt d'un service Guacamole → Le load balancer doit rediriger vers le second. Test 3 : Coupure de lien réseau → Le bonding doit rester actif.	<input type="checkbox"/>
4.2	Livraison Utilisateur	Génération et envoi des identifiants (lien VIP Guacamole, comptes Azure AD). Création d'un guide utilisateur simplifié pour l'accès au portail.	<input type="checkbox"/>
4.3	Documentation Finale	Rédaction du schéma d'architecture réseau définitif. Documentation des procédures de maintenance courante et d'urgence. Archivage de toutes les configurations (Backup de config Proxmox, HAProxy, etc.).	<input type="checkbox"/>

9. Conclusion

L'objectif initial était de concevoir un environnement technologique pour une nouvelle formation à distance de 15 stagiaires et un formateur au CFA Numérique, avec un début prévu en décembre 2025 et une fin en juillet 2026. Le projet visait à garantir l'accessibilité, la performance, la sécurité, la collaboration, et une haute disponibilité tout en maîtrisant les coûts sur une période de 7 mois.

Notre étude comparative a analysé trois solutions principales :

- **Le Cloud Privé**, flexible mais trop coûteux (8 500 € à plus de 16 000 €).
- **Le Cloud Public**, économique mais techniquement complexe et limité en évolutivité.
- **Le Cloud Hybride**, qui combine le meilleur des deux approches.

C'est cette dernière option qui a été retenue. Avec un coût total maîtrisé d'environ 2 000 à 2 900 €, elle offre un excellent retour sur investissement, estimé à 28 € par stagiaire et par mois.

L'architecture repose sur Proxmox VE en local et une intégration à Microsoft Azure.

Elle apporte :

- **Une sécurité moderne** (Azure AD, MFA),
- **Une haute disponibilité** (cluster Proxmox + stockage Ceph + sauvegardes Azure Blob),
- **Une flexibilité pédagogique** (environnements locaux et cloud).

Le travail réalisé a consisté à planifier et documenter la procédure de mise en œuvre, de la préparation de l'infrastructure physique et réseau à la configuration des systèmes d'exploitation (Windows Server, Ubuntu, CentOS) et des services. L'intégration des composants clés comme le cluster Proxmox, le reverse proxy NGINX, le stockage Ceph, et les services Azure a été schématisée pour assurer une connexion sécurisée et redondante pour les stagiaires. La gestion des comptes utilisateurs via Azure AD garantit un accès sécurisé et centralisé.

En résumé, ce projet démontre qu'il est possible de créer un environnement de formation performant et sécurisé avec un budget optimisé, en tirant le meilleur parti des technologies de virtualisation et de cloud.

10. Annexes

Annexe A : Besoins Matériels (Spécifications Détaillées)

Serveurs Proxmox (x2) :

- **CPU** : 2x Intel Xeon Silver 4310 (12c/24t) ou équivalent AMD EPYC
- **RAM** : 128 Go ECC DDR4
- **Disques** :
 - **OS** : 2x SSD NVMe 1 To (RAID 1 logiciel)
 - **Cache** : 4x SSD SATA 2 To (RAID 10)
- **Réseau** : Carte double port 10 Gb SFP+ (pour liaison données/stockage) + Carte double port 1 GbE (pour management)

Stockage Partagé :

- **Type** : SAN iSCSI ou NAS NFS
- **Capacité Utile** : ≥ 10 To (SSD NVMe ou SAS)
- **Connectivité** : 2x 10 GbE minimum (Multi-path obligatoire)

Annexe B : Références & Liens Utiles

- **Documentation Proxmox HA Cluster** : https://pve.proxmox.com/pve-docs/pve-admin-guide.html#_high_availability_cluster
- **Guacamole + Azure AD (SAML)** : <https://guacamole.apache.org/doc/gug/saml-auth.html>
- **Modèle de docker-compose.yml pour Guacamole** : <https://github.com/apache/guacamole-client/tree/master/docker>